

УДК 551.4.044:528.88:551.2

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СДВИГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАЗНОРАНГОВЫХ РАЗЛОМОВ ЗАПАДНОГО ПРИБАЙКАЛЯ НА ОСНОВЕ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЛИНЕАМЕНТОВ

© 2025 г. А. Д. Свечеревский^{1,*}, С. А. Устинов^{1,2}, Д. С. Лапаев¹, В. А. Петров¹

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, Россия

²Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: alexey@svecherevskiy.ru

Поступила в редакцию 11.11.2024 г.

После доработки 02.12.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

С помощью авторского программного обеспечения удалось осуществить детальное выделение линеаментов на различных масштабных уровнях для района Обручевской системы разломов западного Прибайкалья. Выделенные линеаменты значительно дополняют закартированный каркас разрывных нарушений и согласуются с простираем соответствующих по рангу разрывных структур. На основе анализа относительной удельной плотности линеаментов локального масштабного уровня, отражающих опережающие мегатрещины крупных разломов, установлены неоднородные зоны динамического влияния региональных структур, которые разделены на относительно однородные сегменты. Для каждого выделенного сегмента и каждой структуры в целом с помощью разработанного программного обеспечения “Lineament Stress Calculator” проведена реконструкция параметров сдвиговых напряжений с использованием модели П. Л. Хэнкока. Ранее доказано, что основные черты раннепалеозойского этапа развития региона в процессе аккреции Ольхонского террейна к южной окраине Сибирского кратона сопровождалась активизацией правосдвиговых смещений по ЮЗ–СВ аккреционным швам и процессами активного метаморфизма. Полученными результатами подтверждено, что магистральные разломы ЮЗ–СВ простираются, субпараллельные краевому шву Сибирской платформы, на раннем этапе развития формировались как правые сдвиги при ориентировке оси сжатия $\approx 90^\circ$. Разломы второго порядка СЗ–ЮВ ориентировки определены как левые сдвиги и, вероятно, закладывались в это время как антитетические сколы по отношению к магистральным структурам, получив свое развитие при дальнейших структурных перестройках региона.

Ключевые слова: линеаментный анализ, структурно-тектонофизический анализ, напряженно-деформированное состояние, поле напряжений-деформаций, модель сдвига, разлом, западное Прибайкалье.

DOI: 10.31857/S0002333725020085, EDN: DLZQVO

ВВЕДЕНИЕ

Нарушения земной поверхности, которые возможно идентифицировать в результате анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), представлены структурами различной природы и возраста. Линейные элементы, отчетливо прослеживаемые в рельефе, получили название “линеамент” [Hobbs, 1904] и в большинстве случаев маркируют зоны разломов

различного порядка, механизма формирования и возраста. На выделении и интерпретации подобных линейных элементов рельефа основан линеаментный анализ, который считается одним из наиболее эффективных дистанционных методов изучения каркаса разрывных нарушений [Кац и др., 1986].

Выделение линеаментов производится либо в ручном режиме оператором, либо с помощью

специализированного программного обеспечения (ПО). Наиболее широкое распространение среди геологов получило ПО “LESSA”, которое позволяет проводить автоматическое выделение и наиболее комплексную интерпретацию линейных элементов при решении разноплановых задач [Zlatopolsky, 1992].

Часто при проведении структурно-геоморфологических исследований главной проблемой является достоверное выделение разноранговых разрывных структур и их методически верная тектонофизическая интерпретация в контексте геологической истории развития исследуемой территории. В соответствии с представлениями Е.М. Андерсона, выделяются три основных типа разломов: сбросы, сдвиги и надвиги [Anderson, 1905]. В настоящее время большинство специалистов допускают отрывной характер разрушения горных пород, но для описания кинематики смещения по образованному разрыву используют в основном модели сдвига. Это во многом определяется тем, что сдвиговые перемещения смежных блоков вдоль границ разрывных нарушений легче выявлять [Кузьмин, 2018].

На основе результатов моделирования установлено, что внутренняя разрывная структура разломов эволюционирует в рамках нескольких стадий однонаправленно, от многочисленных мелких разрывов, через избирательное разрастание одних и переход в пассивное состояние других при межстадийных перестройках, к единому магистральному шву [Семинский, 2003; Борняков и др., 2014].

В контексте представляемого исследования необходимо отметить, что локализованные участки сдвига окружены зонами поврежденного материала, где трещиноватость снижается по экспоненциальному закону по мере удаления от осевой части магистрального разрыва [Шерман и др., 1983; Faulkner et al., 2011; Шерман, 2014]. Они названы зонами “динамического влияния разломов”, которые имеют крайне неоднородное строение по интенсивности развития трещиноватости и ширине в зависимости от глубины, из-за увеличивающихся среднего давления и температуры, а также сложной геометрии разрыва по простиранию [Anders, Wiltschko, 1994; Wilson et al., 2003; Семинский, 2003; Faulkner et al., 2018].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Западное Прибайкалье представляет собой южную окраину Сибирского кратона. Установлено, что на ранних этапах наибольшее влияние на формирование региона оказала коллизия Сибирского кратона и Баргузинского микроконтинента, отколовшегося от Алданской провинции около 1 млрд лет назад. Этому процессу сопутствовало формирование Ольхонского террейна. На этапе дрейфа Баргузинский микроконтинент претерпел значительные метаморфические изменения в условиях субдукционной обстановки. Процесс сопровождался активным вулканизмом и образованием задугового бассейна, на месте которого в дальнейшем сформировался Ольхонский террейн (рис. 1). Установлено, что



Рис. 1. Схема возможной миграции Баргузинского микроконтинента в неопротерозое — раннем палеозое по работам [Гладкочуб и др., 2010; 2014]: 1 — Баргузинский микроконтинент; 2 — островная дуга; 3 — задуговый бассейн; 4 — зона задугового спрединга; 5 — неопротерозойская рифтовая зона на юго-востоке Сибирского кратона; 6 — палеосубдукционная зона; 7 — предполагаемый трансформный разлом; 8 — направление возможной миграции Баргузинского микроконтинента в неопротерозое—раннем кембрии.

начало развития задугового бассейна в пределах активной окраины происходило 840–800 млн лет назад [Гладкочуб и др., 2010; 2014].

Косое причленение Ольхонского террейна к южной окраине Сибирского кратона в каледонское время (~ 490–460 млн лет назад) привело к образованию коллизионной горной системы. Эти события сопровождалась активизацией правосдвиговых разломов и глубоким метаморфизмом пород ольхонской серии. Дальнейшая денудация в некоторой степени нивелировала рельеф сформированных структур, однако свидетельства ранних тектонических событий сохранились [Федоровский и др., 1995; Зорин и др., 2009]. После завершения коллизионных процессов в мезозое регион вошел в фазу относительной тектонической стабильности.

Кайнозойский этап связан с тектонической инверсией, выраженной в смене обстановки сжатия на растяжение, что характерно для позднеорогенной стадии [Delvaux et al., 1997; San'kov et al., 1997; Парфеев и др., 2002]. Также в это время началось формирование Байкальской рифтовой зоны.

Важно отметить, что предложенные предшественниками модели мезокайнозойского этапа тектогенеза Прибайкалья [Петров и др., 2008] и пространственно-временного развития впадин в мезозое и кайнозое [Лунина и др., 2009] демонстрируют значительные различия. При этом в достаточной мере обосновано только современное напряженное состояние растяжения в СЗ–ЮВ направлении, определенное на основе данных о механизмах очагов землетрясений [Мишарина, Солоненко, 1977; Мельникова, Радзиминович, 2007]. Эти результаты также подтверждаются данными о палеонапряжениях, полученными с использованием геолого-структурных и тектонофизических методов [San'kov et al., 1997; Парфеев и др., 2002; Черемных, 2006; Петров и др., 2008; Лунина и др., 2009]. Однако ранняя эволюция напряженно-деформированного состояния земной коры Прибайкалья остается дискуссионной и требует дополнительных структурных исследований, особенно в отношении разломных зон и слабо нарушенных блоков.

Большинство разломов представляют собой долгоживущие структуры, которые сформировались задолго до кайнозоя и многократно активизи-

ровались на различных этапах тектонической эволюции западного Прибайкалья [Плешанов, Чернов, 1971; Семинский, 2003]. Для палеозойской эры в пределах всей зоны установлено преимущественное региональное сжатие в СЗ–ЮВ направлении, которое также способствовало формированию системы надвигов [Александров, 1990; Delvaux et al., 1995; 1997; Федоровский, 1997]. Основное надвиговое событие произошло в палеозое [Александров, 1990], но структуры сжатия вновь активизировались при более поздних тектонических событиях. В работе [Плешанов, Чернов, 1971] подчеркивается тесная генетическая связь кайнозойских разрывов Байкальской рифтовой зоны с докембрийскими структурами. Возраст последней активности остается плохо установленным и варьирует от мезозоя до миоцена–плиоцена в разных моделях [Александров, 1990; Delvaux et al., 1995; 1997; Лунина и др., 2009; Mats, Perepelova, 2011].

Объектами проведенных реконструкций являются разломы Обручевской системы, которая на современном этапе развития представляет северо-западное плечо Байкальского рифта [Семинский и др., 2012] (рис. 2). Три наиболее протяженных разлома ЮЗ–СВ простирания в различных исследованиях имеют отличающиеся друг от друга наименования. Например, Прибайкальский [Государственная..., 2009] и Прихребтовый [Семинский и др., 2012; 2013; Черемных и др., 2018; Cheremnykh et al., 2020]; Академический часто называют Морским [Аржанникова, Гофман, 2000; Brink, Taylor, 2002; Petit, Dévercherè, 2006; Jolivet et al., 2009; Семинский и др., 2012; Arzhannikova, Arzhannikov, 2019] или Ольхонским [Леви и др., 1997; Delvaux et al., 1997; Мац и др., 2001; Mats et al., 2007]. Чтобы избежать путаницы, в данной статье использованы названия, фигурирующие на государственной геологической карте масштабом 1:1000000 (лист N-48), на правах официально утвержденного документа [Государственная..., 2009].

Приморский глубинный разлом отлично выражен в рельефе в виде уступа и потому является наиболее изученным геолого-структурными и тектонофизическими методами [Mats et al., 2007; San'kov et al., 1997; Lunina et al., 2002]. Данный разлом выступал в качестве генеральной структуры, вдоль которой происходило

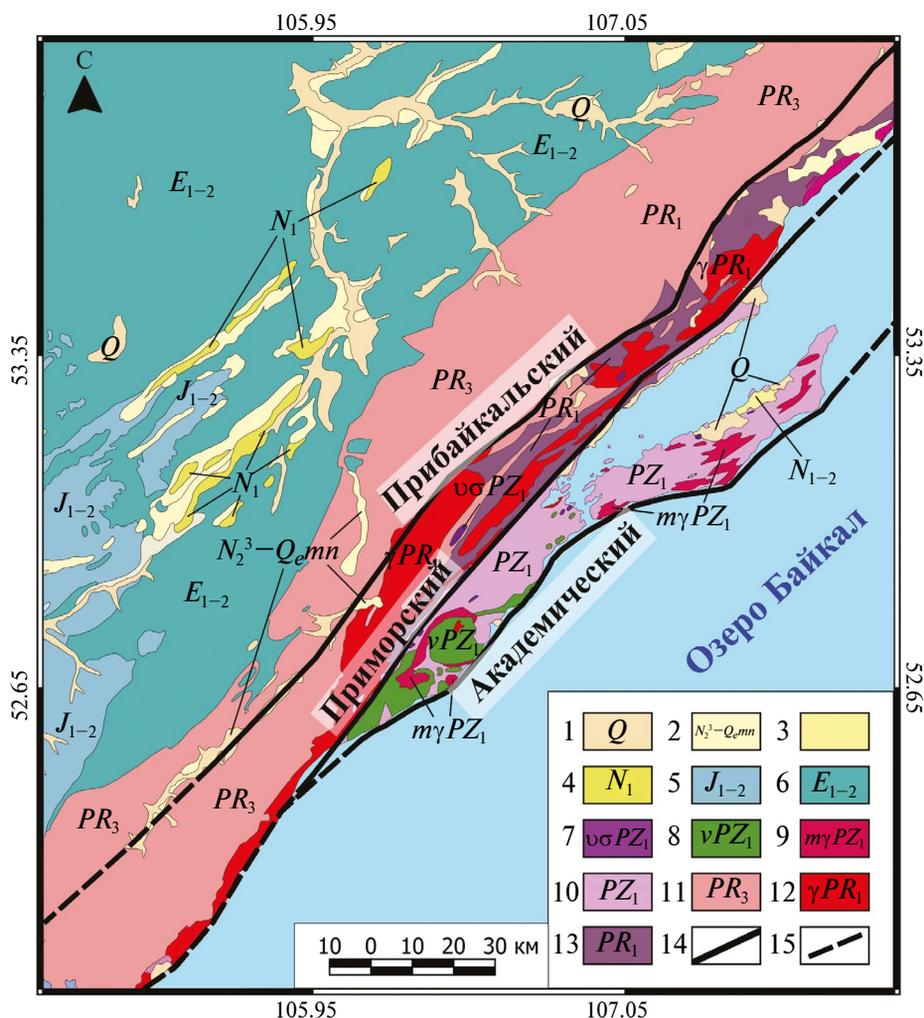


Рис. 2. Геологическая схема района Обручевской системы разломов Байкальской рифтовой зоны по данным работ [Gladkochub et al., 2008; Государственная..., 2009; Донская и др., 2013; Гладкочуб и др., 2014; Donskaya et al., 2017; Cheremnykh et al., 2020]: 1 — прибрежные озерные отложения и аллювий террас речных долин; 2 — Манзурская свита, осадочные отложения; 3 — Халагайская и Харандинская свиты объединенные, осадочные отложения; 4 — Баяндайская свита, осадочные отложения; 5 — Юрские отложения чехла сибирской платформы; 6 — отложения нижнего и среднего кембрия Сибирского кратона; 7 — Атарханский перидотит-габбровый комплекс; 8 — Озерский габбро-диоритовый комплекс; 9 — Ольхонский мигматит-гранитный комплекс; 10 — раннепалеозойские метаморфические комплексы Ольхонского террейна; 11 — верхнепротерозойские отложения (Байкальская группа); 12 — Приморский гранитный комплекс; 13 — фундамент раннепротерозойского кратона; 14 — основные разломы; 15 — предполагаемые простирания сместителей основных разломов.

активное скольжение блоков Ольхонского террейна относительно Сибирской платформы без значительных преобразований ее структуры. Чернорудско-Баракчинская зона к юго-востоку от Приморского разлома содержит метаморфизованные породы, свидетельствующие о высоких температурах и давлениях, достигнутых в процессе аккреции и коллизии [Скляр и др., 2013]. В кайнозой, в процессе формирования Байкальской рифтовой зоны, Приморский разлом начал функционировать как сброс в условиях растяжения коры [Обухов, Ружич, 1971;

Шерман, Днепровский, 1989; Lunina et al., 2002, Mats et al., 2007]. На неотектоническом этапе основной сместитель дизъюнктива формировался как сброс с незначительной левосторонней сдвиговой компонентой [Черемных, 2011].

Гораздо в меньшей степени изучены Прибайкальский и Академический разломы. Прибайкальский разлом условно разделяет Сибирскую платформу и Прибайкальский прогиб от Прибайкальской складчатой области. Он отличается значительной протяженностью и мощной зоной деформаций, в пределах ко-

торой получили максимальное развитие все разновидности тектонитов, локализованные в раннедокембрийских и рифейских породах.

Академический разлом, отделяющий юго-восточную часть Ольхонского выступа от Байкальской впадины, также является важным элементом региональной тектоники, хотя его выраженность в рельефе проявлена слабо из-за частичного простиранья под водами озера Байкал.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Линеаменты в представляемой работе, в отличие от большинства подобных исследований, выделялись не по космоснимкам, а на основе подготовки, обработки, визуализации и автоматизированного анализа цифровой модели рельефа (ЦМР), что обеспечивает более точное обнаружение большего количества линейных элементов. Для создания ЦМР использовались данные FABDEM с пространственным разрешением 30 м на пиксель [Hawker et al., 2022].

В соответствии с предлагаемой методикой для учета всех структурных особенностей рельефа при выделении линеаментов осуществлялось создание схем теневого рельефа, которое реализовано с помощью авторского ПО “DEM Maker”. Это позволяет визуализировать рельеф с использованием ЦМР под различными углами освещения, применяя нелинейную направленную фильтрацию, что минимизирует ошибки выделения линейных структур, возникающие из-за значительно затененных или засвеченных участков. Фильтрация изображения производилась по четырем направлениям: С–Ю (0°), СВ–ЮЗ (45°), В–З (90°) и ЮВ–СЗ (135°). Для отражения всех структурных особенностей рельефа, в соответствии с общепринятыми методиками [Енох et al., 2021], достаточно учитывать позиции источника света в обозначенных четырех направлениях. Направления фильтрации Ю–С (180°), ЮЗ–СВ (225°), З–В (270°) и СЗ–ЮВ (315°) демонстрируют абсолютно идентичные обозначенным выше направлениям результаты выделения линеаментов.

Для автоматического построения линеаментной сети авторами разработано ПО “Line Maker”. Данный инструмент осуществляет оптимальное выделение линеаментов с использованием фильтров и алгоритмов, специально адаптиро-

ванных для анализа выявленных геоморфологических особенностей исследуемого региона с учетом расчлененности рельефа.

Используемый подход, принимая во внимание высокое пространственное разрешение исходной ЦМР, позволил выделить на территории множество непротяженных линеаментов, которые могут быть проинтерпретированы в качестве так называемых “мегатрещин”, оперяющих протяженные разрывные структуры и условно относящихся к локальному масштабному уровню [Петров и др., 2010; Ребецкий и др., 2017]. Для выделения линеаментов низших рангов пространственное разрешение ЦМР искусственно занижалось, и процедура выделения линейных элементов повторялась. Таким образом удалось сгруппировать различные по протяженности и ориентировкам линеаменты, которые не повторяют, а дополняют друг друга на всей площади исследуемой территории. Каждой группе присвоен ранг, исходя из отношения протяженности самих линеаментов к масштабу площади, на которой они расположены. Выделенные группы отнесены к четырем масштабным уровням: региональному, субрегиональному, надлокальному и локальному (рис. 3). Для построения линеаментов “регионального” уровня эмпирически подобрано разрешение ЦМР 800 метров на пиксель, для “субрегионального” — 400 метров на пиксель, для “надлокального” — 120 метров на пиксель, а для “локального” разрешение ограничилось максимальным для исходной ЦМР, т.е. 30 метров на пиксель. Стоит отметить, что в случае с “региональным” масштабным уровнем дальнейшее занижение качества ЦМР приводило к резкому сокращению количества линеаментов, а также к ошибкам наложения на геоморфологически выраженные структуры, поэтому было принято решение оставить разрешение 800 метров на пиксель как наиболее оптимальное для построения самых протяженных линеаментов.

С целью последующей сегментации разломных зон для линеаментов различных масштабных уровней строились розы-диаграммы и схемы относительных удельных плотностей их распределения. Для обеспечения корректности интерпретации данных и наглядного представления пространственного распределения линеаментов эмпирически определены

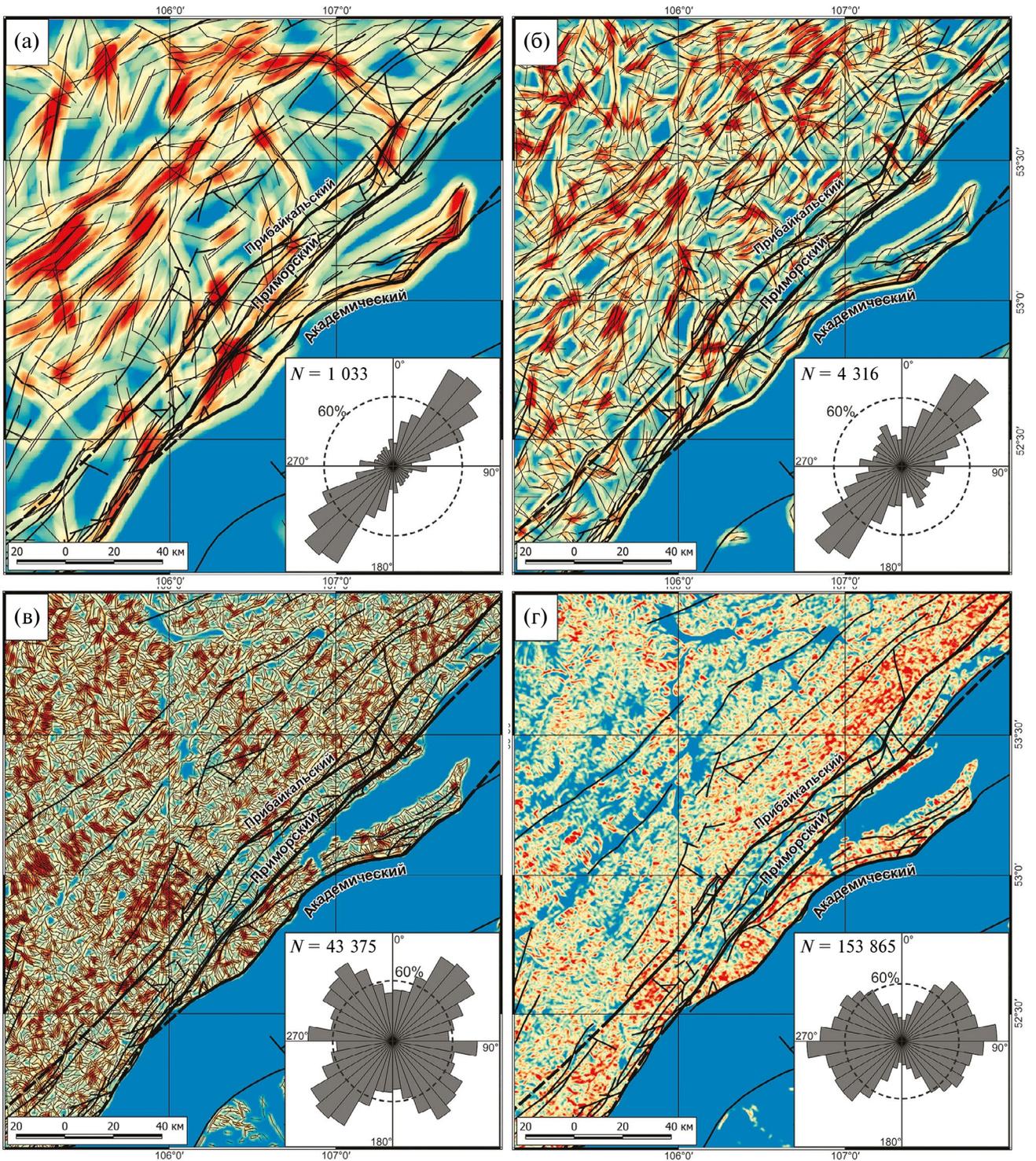


Рис. 3. Схемы относительной удельной плотности и розы-диаграммы ориентировки выявленных линейaments для различных масштабных уровней Обручевской системы разломов Байкальской рифтовой зоны: (а) — региональный; (б) — субрегиональный; (в) — надлокальный; (г) — локальный. Толстые черные линии — разломы Обручевской системы и другие установленные разрывные нарушения, тонкие черные линии — выявленные линейaments. От синих к красным областям показано увеличение относительной удельной плотности линейных объектов. N — количество выявленных линейaments на определенном масштабном уровне.

оптимальные параметры расчета схем плотности (радиус поиска и размер пикселя) объектов для каждого из масштабных уровней. Это позволило создать схемы относительной удельной плотности с отображением локальных минимумов и максимумов скопления линейных объектов, по которым в дальнейшем производилась сегментация разломных зон.

Построенные розы-диаграммы иллюстрируют основные азимуты простираения линейаментов на всех исследуемых масштабных уровнях и согласуются с простираением соответствующих по рангу известных разрывных структур. При этом выделенные разноранговые линейаменты значительно дополняют известный каркас разрывных нарушений. На региональном уровне наблюдается ЮЗ–СВ простираение наиболее протяженных линейаментов, что соответствует ориентировкам ранее установленных и заверенных региональных разрывных нарушений Обручевской системы. На субрегиональном масштабном уровне линейаменты преимущественно сохраняют ЮЗ–СВ ориентировки, однако начинают проявляться слабовыраженные системы разрывов второго ранга ЮВ–СЗ и субширотного простираения. При рассмотрении надлокального масштабного уровня отчетливо проявляются три системы линейаментов — ЮЗ–СВ, ЮВ–СЗ и субширотного простираения. На локальном масштабном уровне, при анализе наименее протяженных линейаментов, выстраивается основная субширотная система с затухающими менее проявленными системами ЮЗ–СВ и ЮВ–СЗ ориентировки (см. рис. 3).

Для решения задачи реконструкции параметров регионального поля напряжений-деформаций (ПНД), кинематики основных разломов на определенном этапе геологического развития региона на основе интерпретации выделенных линейаментов рассмотрены наиболее распространенные и заверенные в результате лабораторных экспериментов тектонофизические модели формирования парагенезиса оперяющих трещин магистрального разлома в зоне сдвига. Модель П. Л. Хэнкока [Hancock, 1985], как наиболее комплексная, легла в основу проведенных нами реконструкций.

Специально для интерпретации ориентировок выделенных линейаментов создано ПО “Lineament Stress Calculator” (LSC). Про-

граммный алгоритм автоматически определяет наличие сдвига и его тип в исследуемой части разлома, а также анализирует и классифицирует оперяющие разрывные структуры по типам на основе их пространственного положения и азимута простираения относительно сместителя магистральной структуры, который определяется по формуле:

$$\Theta_{отн} = (\Theta_c - \Theta_p + 360) \bmod 360,$$

где: Θ_c — азимут оперяющей структуры (R -, R' -, P -, X - или T -трещин); Θ_p — азимут главного разлома; $\bmod 360$ — операция взятия остатка от деления на 360, чтобы результат оставался в пределах от 0 до 360° .

Разработанная концепция дает возможность реконструировать тип сдвига — правый или левый, а также косвенно оценить интенсивность смещений или доказать их отсутствие. На интенсивность смещений указывает отношение количества сколов к количеству других типов трещин.

Для формализации метода используется достаточно простой, установленный на основе многочисленных проведенных лабораторных экспериментов [Черемных и др., 2017; Корбутяк и др., 2018; Фролова и др., 2019] принцип формирования оперяющих трещин в зоне магистрального разлома на фоне сдвига и применена следующая формула:

$$\Delta N = (N_1 + N_3) - (N_2 + N_4),$$

где: N_1 — количество оперяющих структур с азимутом простираения от 0 до 90° (первая четверть) относительно сместителя магистрального разлома; N_2 — количество оперяющих структур с азимутом простираения от 90 до 180° (вторая четверть) относительно сместителя магистрального разлома; N_3 — количество оперяющих структур с азимутом простираения от 180 до 270° (третья четверть) относительно сместителя магистрального разлома; N_4 — количество оперяющих структур с азимутом простираения от 270 до 360° (четвертая четверть) относительно сместителя магистрального разлома (рис. 4).

Правый сдвиг определяется при $\Delta N > 0$, левый сдвиг — при $\Delta N < 0$, $\Delta N \approx 0$ указывает на симметричное распределение оперяющих структур, что может означать отсутствие сдвиговой компоненты или, в редких случаях, реверсе

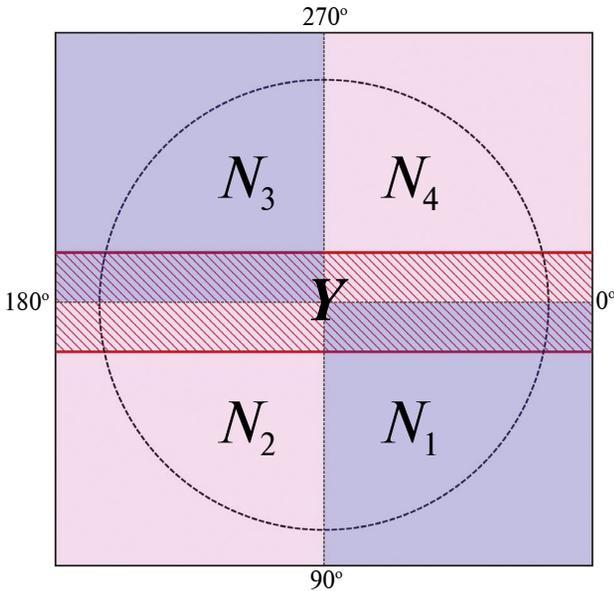


Рис. 4. Схема расположения четвертей (N_1-N_4) пространственного распределения оперяющих структур относительно ориентировки сместителя магистрального разлома (красная штриховка — Y).

сдвига по магистральной структуре, когда на начальном этапе, например, происходили правые сдвиги, а потом, в результате смены параметров ПНД, наблюдался левый сдвиг. Формализованный подход для определения типа кинематики разлома подтвержден в многочисленных лабораторных экспериментах по моделированию обстановки сдвига. Первыми формируются сколы двух типов R и R' . В процессе продолжающегося сдвига количественно будут преобладать R -сколы, однако бывают случаи, когда R -скол после формирования магистрального сместителя сливается с R' -сколом, образуя единую структуру. Система $R-T-R'$, в зависимости от типа сдвига, будет значительно преобладать над другими типами трещин в зоне разлома.

После установления кинематики магистрального разлома следующим шагом является классификация непротяженных линейментов (мегатрещин) в пределах отдельных сегментов магистрального разрыва (Y). На основе лабораторных опытов установлено, что угол трения для основных типов горных пород составляет φ в диапазоне $30-40^\circ$. Синтетические сколы (R) и вторичные синтетические сколы (P) при сдвиговых смещениях ориентированы под углом $\varphi/2$, то есть приблизительно $15-20^\circ$ относительно азимута простирания главного разлома. Антитетические сколы (R), обладающие сдвиговой

компонентой, противоположной смещениям по основному разлому, ориентированы под углом $(90^\circ - \varphi/2)$ к направлению генерального сдвига, что составляет примерно $60-75^\circ$. Биссектриса острого угла между синтетическими и антитетическими сколами (R - и R') отражает ориентировку оси максимального сжатия, обозначаемую σ_1 , биссектриса тупого угла — ось растяжения — σ_3 (рис. 5). Именно в этой зоне, под углом около 45° к направлению генерального сдвига, формируются трещины отрыва (T), субпараллельные оси максимального сжатия.

Считается, что R -, R' -сколы (сдвиги) и T -трещины (отрывы) являются первичными структурами, которые образуют единую триаду, доминирующую над всеми остальными структурами в зоне сдвига до формирования магистрального разлома [Гзовский, 1975]. Вторичные P - и X -сколы (сдвиги), которые противоположны друг другу по кинематике, формируются в результате подвижек по магистральной структуре. Однако их вклад в развитие общей системы структур в зоне сдвига менее выражен по сравнению

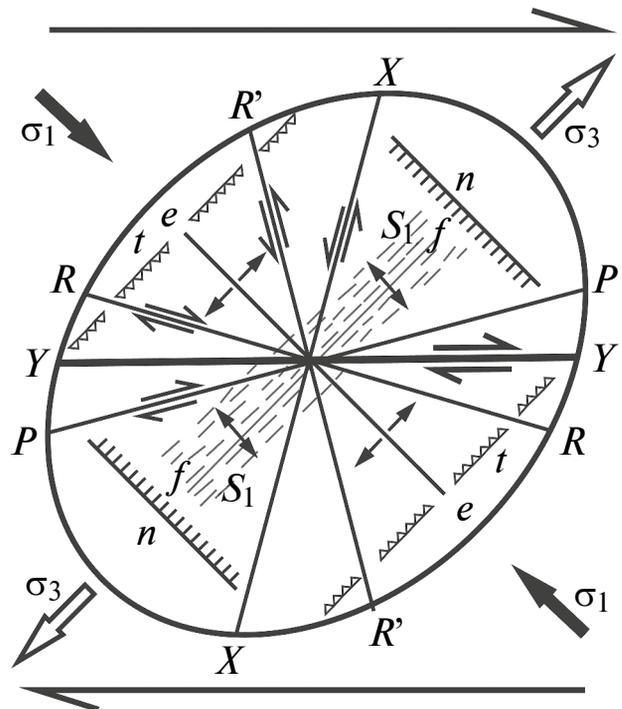


Рис. 5. Системы эшелонированных структурных элементов, образующихся в сдвиговой разломной зоне при простом скальвании [Hancock, 1985]: Y — магистральный сдвиг; R и R' — сопряженные сколы Риделя; X , P — вторичные сдвиги; e — отрывы; n — сбросы; t — взбросы; f — складки; S_1 — кливаж; σ_1 — ось максимального сжатия; σ_3 — ось максимального растяжения.

с R - и R' -сколами, что также подтверждается лабораторными опытами [Черемных и др., 2017; Корбутяк и др., 2018; Фролова и др., 2019].

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе анализа созданной для локального масштабного уровня схемы относительной удельной плотности линеаментов, наиболее вероятно отражающих оперяющие крупные протяженные структуры мегатрещины, выявлено чередование областей с максимальной и минимальной плотностью объектов по простиранию (ЮЗ–СВ) региональных разломов Обручевской системы (рис. 6). Также от предполагаемого сместителя протяженных разломов до некоторого удаления от нее плотности выявленных линейных объектов формируют четкие зоны максимумов и минимумов, которые могут быть проинтерпретированы как вероятные зоны динамического влияния данных региональ-

ных структур. При этом ширина зон влияния не является одинаковой на всем протяжении разрывных нарушений, напротив, наблюдаются локальные “расширения” и “сужения”. Подобные зоны выделены и для разрывных структур второго ранга (в масштабе исследуемой площади) СЗ–ЮВ простирания.

Для каждой установленной зоны динамического влияния разломов и каждого выделенного сегмента проводились реконструкции параметров ПНД с помощью ПО LSC. В зоне Прибайкальского разлома выделено 17 сегментов и классифицированы 12172 линеамента (рис. 7). Структуры, отнесенные к магистральному сместителю Прибайкальского разлома (Y), идентифицированы в количестве 921 шт. Первичные (синтетические) сколы (R) наиболее проявлены — их количество составляет 1757 шт. Также хорошо проявлены предполагаемые Т-трещины (1553 шт.). Антитетических сколов (R') выявлено 1439 шт. Эта первичная триада трещин имеет простирание в четвертях N_1 и N_3 относительно магистральной структуры. Вторичные P - и X -сколы простираются в области четвертей N_2 и N_4 в количестве 608 и 665 шт. соответственно. Количественное отношение R -, R' - и Т-структур к P - и X -трещинам составляет 3.7. Таким образом, ориентировки доминирующей первичной триады оперяющих трещин свидетельствуют о правосторонней сдвиговой кинематике Прибайкальского разлома.

Примечательно, что в большинстве сегментов Прибайкальского разлома сколы Риделя (R') проявляются СЗ–ЮВ простиранием, что соответствует большинству крупных (второго ранга) геоморфологически выраженных нарушений этого региона. Данные структуры, в соответствии с примененной моделью, характеризуются противоположной (левосдвиговой) кинематикой относительно магистральных разломов. Региональная ось сжатия зоны всего Прибайкальского разлома имеет ориентировку, близкую к субширотной. Установленные оси сжатия и растяжения в сегментах Прибайкальского разлома варьируются в пределах 30° и в целом соотносятся с региональными параметрами ПНД.

В области простирания Приморского разлома выделено и классифицировано 6459 линеаментов. В структуре разломной зоны

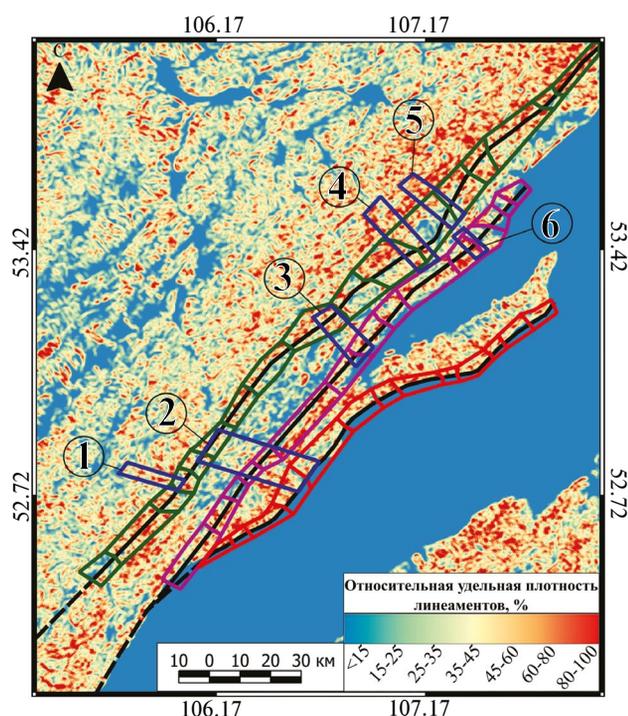


Рис. 6. Схема относительной удельной плотности линеаментов локального масштабного уровня и выделенные зоны динамического влияния с однородными сегментами зон разноранговых разломов: зеленый — Прибайкальский разлом; фиолетовый — Приморский разлом; красный — Академический разлом; синий — зоны влияния разрывов второго ранга: 1 — Хидусская зона, 2 — Ангинская зона, 3 — Сарминская зона, 4 — Среднеиликтинская зона, 5 — Правоиликтинская зона, 6 — Зундукская зона.

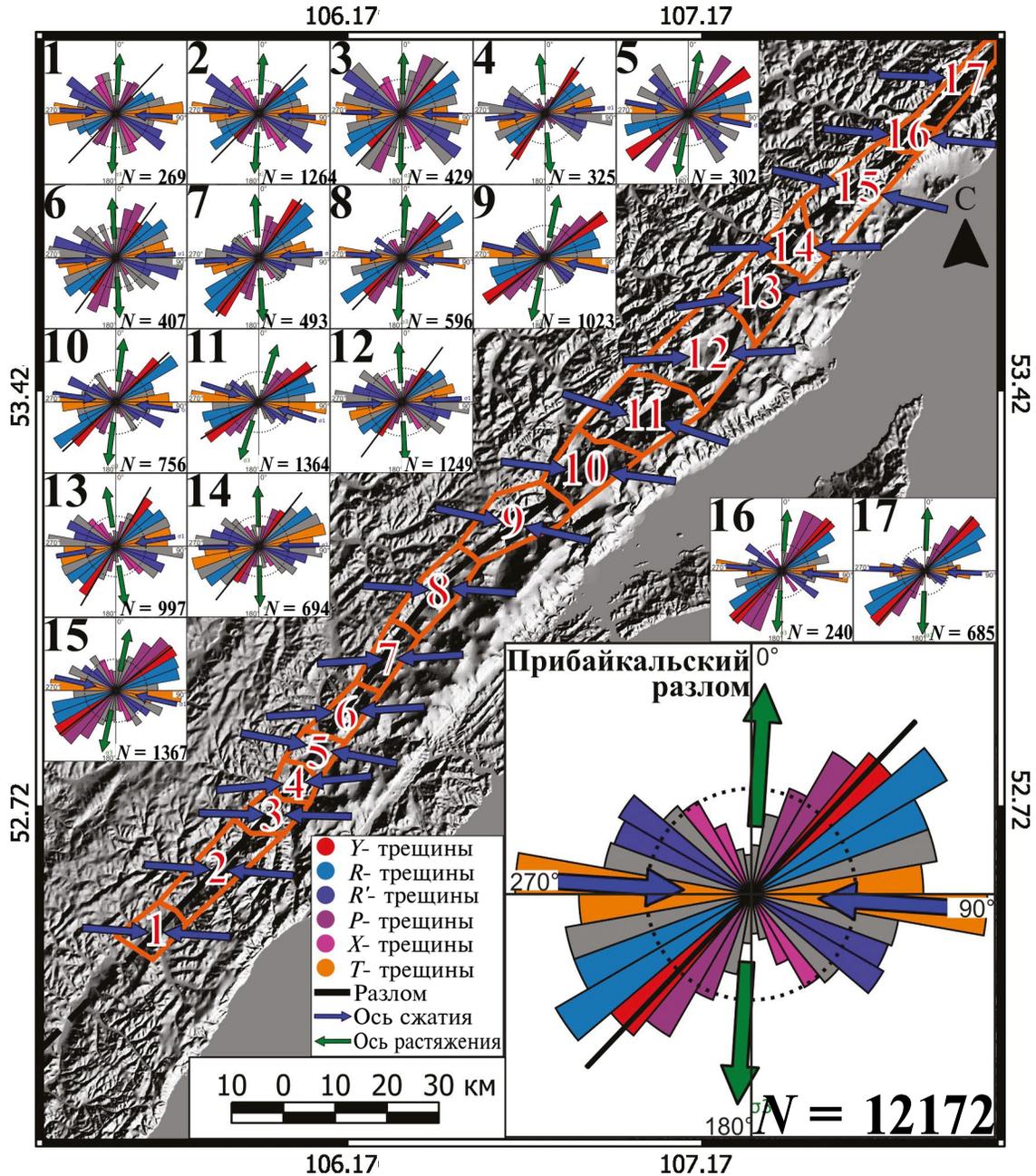


Рис. 7. Результат тектонофизической интерпретации параметров ПНД на основе анализа мегатрещин для зоны Прибайкальского разлома и ее сегментов с помощью ПО LSC. Цифрами указаны номера сегментов зоны разлома и соответствующие им розы-диаграммы.

выделено 15 сегментов (рис. 8). Относящиеся к магистральному сместителю (Y) мегатрещины идентифицированы в количестве 647 шт. Как и в случае с Прибайкальским разломом, большинство из классифицированных структур определяются как синтетические сколы (R) — 927 шт. Т-трещины также хорошо проявлены (678 шт). Антитетических сколов (R') 703 шт. Эти системы первичных оперяющих структур имеют ориентировки, попадающие в N_1 и N_3 .

Простирающиеся в диапазоне N_2 и N_4 P - и X -трещины определяются в количестве 382 и 418 шт., соответственно. Количественное отношение R -, R' - и T -структур к P - и X -трещинам составляет 2.9, что свидетельствует об однозначной праводвиговой кинематике Приморского разлома. Ось сжатия в зоне динамического влияния разлома ориентирована субширотно, а по сегментам Приморского разлома расположена близко к субширотной ориентировке и варьи-

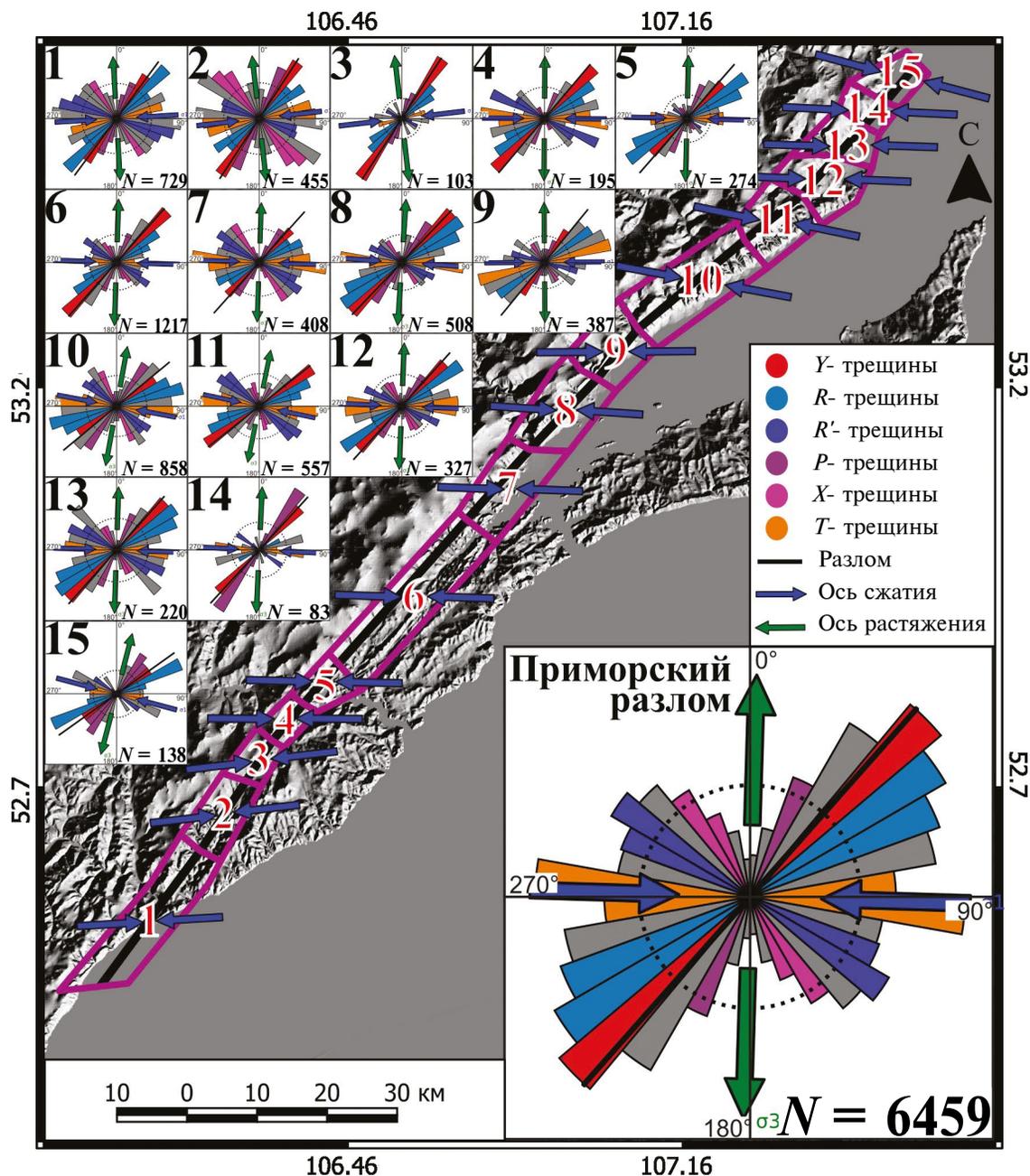


Рис. 8. Результат тектонофизической интерпретации параметров ПНД на основе анализа мегатрещин для зоны Приморского разлома и ее сегментов с помощью ПО LSC. Цифрами указаны номера сегментов зоны разлома и соответствующие им розы-диаграммы.

руется весьма незначительно, не превышая 15° . Для зоны Приморского разлома также характерно СЗ–ЮВ простирание R' -трещин, которые отчасти выходят за условные границы зоны динамического влияния разлома и пересекают соседнюю зону Прибайкальского разлома.

Академический разлом, простирающийся по береговой части юго-западного Прибайкалья и западной границе острова Ольхон, частично скрыт водами озера Байкал, что усложняет

реконструкцию параметров ПНД при его формировании. Однако большинство сегментов зоны разлома также показали правостороннюю сдвиговую кинематику. Полученная картина имеет схожие черты с Прибайкальским и Приморским разломами. В разломной зоне выделено 13 сегментов (рис. 9). На всем ее протяжении классифицированы 3433 линеамента. Структуры, подчеркивающие магистральную структуру (Y), выявлены в количестве 502 штук.

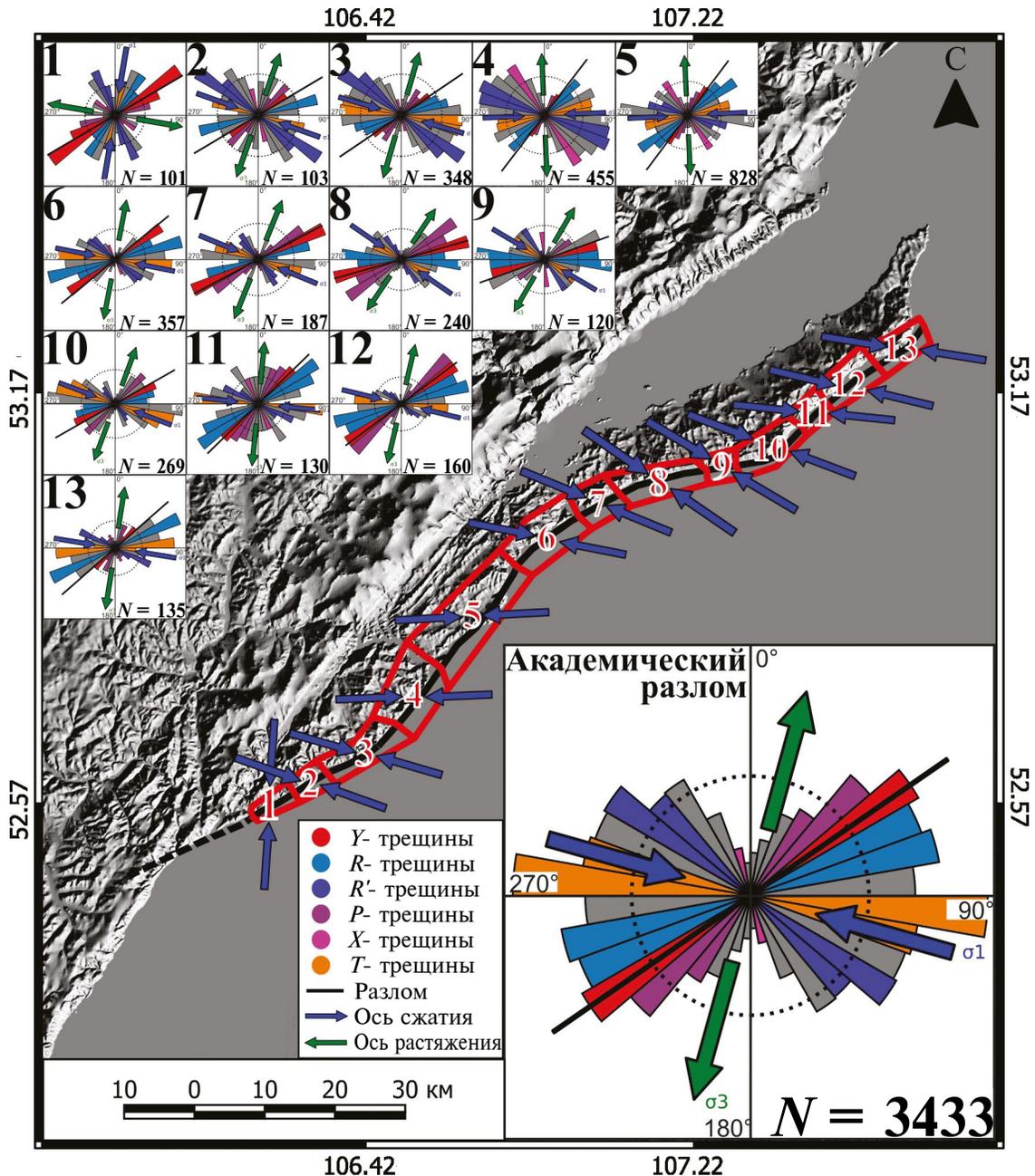


Рис. 9. Результат тектонофизической интерпретации параметров ПНД на основе анализа мегатрещин для зоны Академического разлома и ее сегментов с помощью ПО LSC. Цифрами указаны номера сегментов зоны разлома и соответствующие им розы-диаграммы.

R-сколы, как и в предыдущих случаях, являются наибольшей по количеству группой, включающей 611 объектов. Т-трещин выделено 389 шт. Антитетические сколы (*R'*) идентифицированы в количестве 529 шт. *P*-, *X*-трещины, как и в случаях с другими разломами Обручевской системы, выявляются в меньшинстве — 342 и 198 шт. соответственно. Количественное отношение *R*-, *R'*- и Т-структур к *P*- и *X*- трещинам равно 2.8. Таким образом, даже несмотря на неполную

выраженность структур в рельефе, удалось однозначно установить правостороннюю сдвиговую компоненту Академического разлома. Ось сжатия для зоны влияния Академического разлома ориентирована на 120° . Оси сжатия, установленные для сегментов разлома, варьируются более значительно, чем для других исследуемых структур — от субширотной до СЗ–ЮВ. Вероятнее всего, такой обширный диапазон ориентировок осей сжатия в сегментах обусловлен именно

плохой геоморфологической выраженностью, а также сложной геометрией сместителя разлома, измененной вследствие более поздних геодинамических событий.

Выделенные по результатам анализа схем относительной удельной линейной плотности линейных разломные зоны СЗ–ЮВ простирания имеют очень хорошую геоморфологическую выраженность. Каждая из этих зон в рельефе представлена ущельем и речной долиной, секущей складчатую область Прибайкалья. Выделенные зоны однозначно являются частью общего тектонического каркаса района Обручевской системы разломов и относятся к разрывным нарушениям второго порядка. Для каждой из установленных зон системы данных структур доминирующее простирание оперяющих мегатрещин находится в диапазонах значений, относящихся к четвертям N_2 и N_4 , что однозначно указывает на левостороннюю сдвиговую компоненту (рис. 10). Вполне вероятно, что данные системы разломов изначально закладывались как антитетические (R') структуры по отношению к магистральным более протяженным разрывам ЮЗ–СВ простирания. Дальнейшие этапы активизации, выраженные в инверсии параметров ПНД и левосторонних сдвигах по главным ЮЗ–СВ структурам, а также смене обстановки сжатия на растяжение при раскрытии Байкальского рифта, способствовали более мощному развитию данных СЗ–ЮВ структур.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные ранее многими учеными структурно-тектонифизические реконструкции на основе анализа данных ДЗЗ, топографических основ, полевых и лабораторных исследований зон разрывных нарушений Прибайкалья позволили реконструировать различные этапы развития региона, обозначенные в разделе “Объект исследования” данной статьи. В контексте проведенных изысканий имеет смысл сравнить полученные авторами результаты с интерпретацией линейных элементов, осуществленной предшественниками.

Так, в районе Бугульдейского дизъюнктивного узла ручным способом откартированы линейные элементы, отражающие тектонические и особенно неотектонические деформации. Выявлено два основных тектонических этапа: взбросо- и сбросообразование. При анализе слабовыраженных

в рельефе линейных элементов проявился парагенез левостороннего сдвига, который является более поздним по отношению к этапу сжатия. Данные результаты относятся к вероятным возрастам от позднего мезозоя до плиоцен-четвертичного [Черемных, 2018; Cheremnykh et al., 2020].

На основе автоматического выделения линейных элементов и их анализа с помощью ПО “LESSA” для зоны сочленения Байкальской рифтовой зоны и южной окраины Сибирской платформы определена предполагаемая ширина и ее морфоструктурные особенности, такие как клавишное строение. Выделены геоблоки, незначительно подвергшиеся влиянию современной фазы активности. Доказано, что элементы древней структуры реактивируются в плиоцен-четвертичное время в разных геодинамических условиях. Молодые (позднеплейстоцен-четвертичные) сбросы и сбросо-сдвиги часто используют плоскости древних разломов, представлявших собой взбросы и надвиги. Отмечается, что полученные результаты с использованием линейного анализа соответствуют процессам, происходившим не ранее плиоцен-четвертичного времени. Также, подобно представленным в данной статье результатам, на основе анализа схем относительных удельных плотностей мегатрещин относительно региональных структур определена ширина зон динамического влияния протяженных разломов [Иванченко, Горбунова, 2021; Ivanchenko et al., 2022].

Необходимо отметить, что в приведенных выше работах предшественников, касающихся тектонофизической интерпретации линейных элементов Прибайкалья, изначально использовался отличающийся от примененного в данном исследовании способ выделения линейных элементов. Линейные элементы рельефа ранее маркировались ручным способом на основе топографических основ. Их положение также уточнялось с помощью визуального анализа ЦМР, созданной по данным радиолокационных съемок SRTM или ASTER. Количество выделенных в данных работах линейных элементов для тех же областей отличается в меньшую сторону от выделенных в представляемом исследовании в сотни, а иногда и тысячи раз, в зависимости от масштабного уровня генерализации ЦМР. При этом акцент сделан на экспертном выделении более молодых, отчетливо прояв-

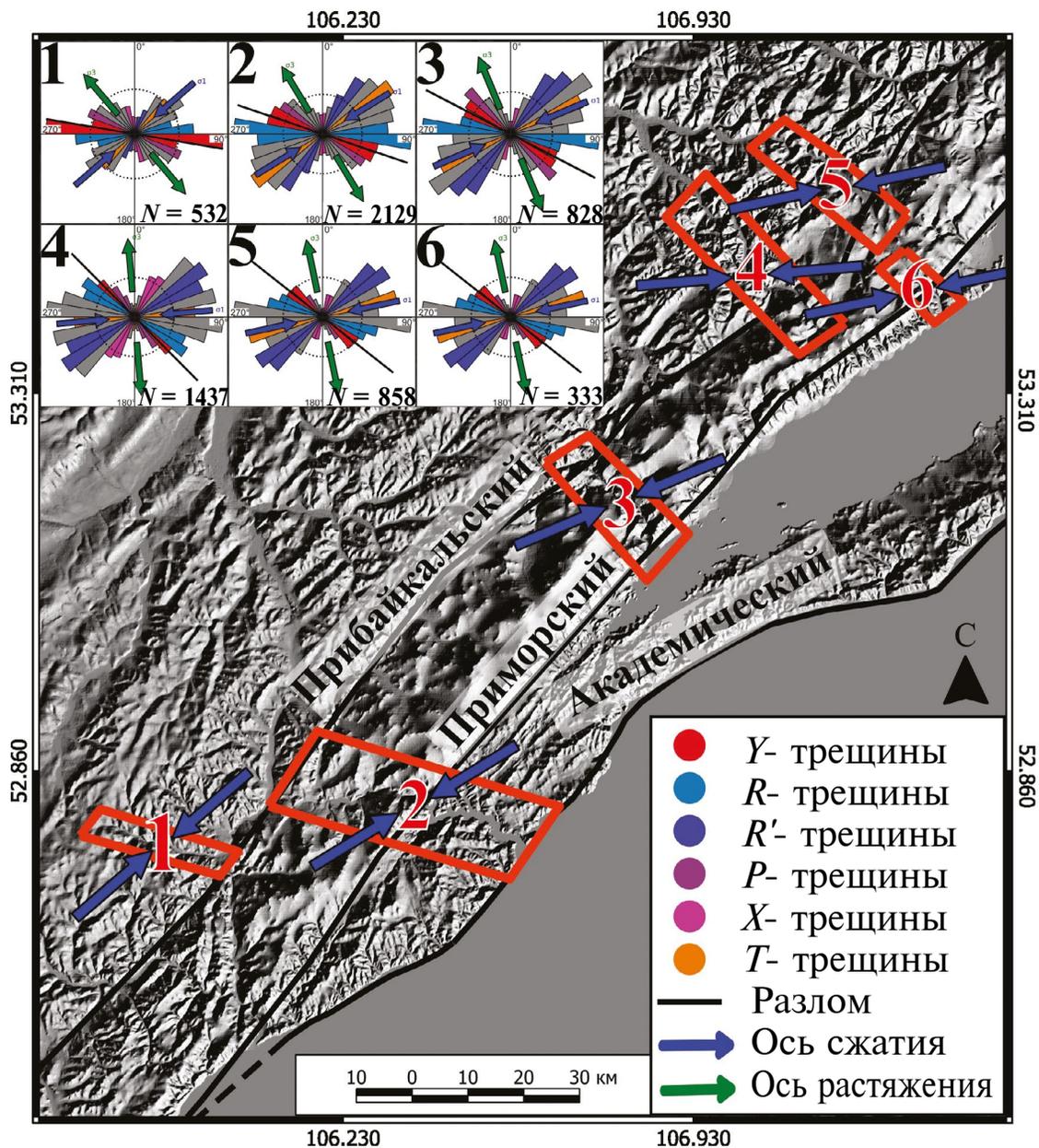


Рис. 10. Результат тектонофизической интерпретации параметров ПНД на основе анализа линеаментов для системы зон разломов ЮВ–СЗ простирания с помощью ПО LSC. Цифрами указаны номера сегментов зоны разлома и соответствующие им розы-диаграммы.

ленных структур, маркируемых линеаментами, что на основе сравнения со структурными парагенезисами разломных зон [Семинский, 2014] позволило выявить несколько этапов развития, которые в целом согласуются с полученными ранее результатами с помощью структурно-парагенетического анализа разрывов и трещиноватости массивов горных пород Прибайкалья [Черемных и др., 2018; Cheremnykh et al., 2020]. Данные исследования, как отмечают авторы,

крайне детально отражают эволюцию структурно-тектонического развития региона преимущественно на неотектоническом этапе.

В представляемом исследовании применен подход автоматического выделения линеаментов с помощью разработанного авторами ПО на основе ЦМР, что позволяет маркировать и проводить автоматическую интерпретацию большого количества разноранговых линеаментов (см. рис. 3). Важно отметить, что при интерпретации

линеаментов акцент сделан на реконструкции параметров именно сдвиговых напряжений для воссоздания обстановки ранних этапов развития западного Прибайкалья, связанных с раннепалеозойскими коллизионными процессами, которые, по мнению многих исследователей, происходили на фоне правосдвиговых крупноамплитудных смещений по основным магистральным разломам. Данный этап в геологической истории Прибайкалья установлен исключительно с помощью геодинамических реконструкций. Учитывая доказанную тесную генетическую связь кайнозойских разрывов Байкальской рифтовой зоны с докембрийскими структурами, результаты структурно-геоморфологического анализа должны отражать и более ранние этапы развития региона, что и доказано в рамках представленного исследования. Данный вывод не согласуется с представлениями о том, что выделяемые в регионе линеаменты, выделенные автоматически с помощью ПО “LESSA”, соответствуют тектоническим структурам исключительно плиоцен-четвертичного времени [Иванченко, Горбунова, 2021; Ivanchenko et al., 2022]. Как уже отмечалось выше, предыстория тектонического развития западного Прибайкалья обусловлена всеми предыдущими этапами, которые, безусловно, находят свое отражение в современной линеаментной сети. Причем древние процессы аккреции и коллизии проявились гораздо мощнее по сравнению с более молодыми процессами активизации территории, которые во многом наследуют их структурные черты. При достаточной статистически значимой выборке объектов и ее методически верной тектонофизической интерпретации появляется возможность реконструкции данных ранних этапов, связанных преимущественно со сдвиговыми напряжениями.

В дальнейшем авторы планируют учесть в созданном ПО модели формирования парагенезисов не только сдвиговых, но и сбросовых и взбросовых зон для более детальной интерпретации линеаментов и выделения других этапов эволюции долгоживущих разломов не только западного Прибайкалья, но и других сейсмоактивных территорий. Кроме того, в применяемых моделях в дальнейшем необходимо учитывать преобладание сжимающих или растягивающих напряжений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе авторского подхода к выделению и тектонофизической интерпретации линеаментов, а также специально разработанного для решения этой задачи программного обеспечения “DEM Maker”, “Line Maker” и “Lineament Stress Calculator”, включающего фильтрацию цифровой модели рельефа, выделение линейных элементов рельефа в зависимости от геоморфологических особенностей исследуемого региона и интерпретацию пространственного положения данных линейных объектов с помощью модели формирования парагенезиса оперяющих трещин магистрального разлома в зоне сдвига П. Л. Хэнкока, для района Обручевской системы разломов западного Прибайкалья удалось выделить линеаменты на различных масштабных уровнях и провести для них реконструкцию параметров сдвиговых напряжений.

Установлено, что выделенные на четырех масштабных уровнях (региональный, субрегиональный, надлокальный, локальный) линеаменты значительно дополняют известный каркас разрывных нарушений и согласуются с простираем соответствующих по рангу известных разрывных структур. При этом непротяженные линеаменты рассматривались в качестве мега-трещин, оперяющих протяженные разрывные структуры.

Для каждого из рассмотренных разломов Обручевской системы на основе анализа относительной удельной плотности предполагаемых оперяющих разрывных структур установлены неоднородные зоны динамического влияния региональных разломов ЮЗ–СВ простираения, которые разделены на относительно однородные сегменты.

Для каждого выделенного сегмента зоны динамического влияния разломов с помощью разработанного программного обеспечения проведена реконструкция параметров поля напряжений-деформаций. Таким образом установлено, что магистральные разломы ЮЗ–СВ простираения, субпараллельные краевому шву Сибирской платформы, на раннем этапе развития формировались как правые сдвиги при ориентировке оси сжатия $\approx 90^\circ$. Разломы СЗ–ЮВ ориентировки определены как левые сдвиги и, вероятно, закладывались как антитетические

сколы по отношению к магистральным структурам, получив свое развитие при дальнейших структурных перестройках региона.

Полученные результаты отражают основные черты раннепалеозойского этапа развития региона в процессе аккреции Ольхонского террейна к южной окраине Сибирского кратона, что сопровождалось активизацией праводвиговых смещений по главным ЮЗ–СВ региональным разломам (аккреционным швам) и процессами активного метаморфизма.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-77-10087, <https://rscf.ru/project/20-77-10087/>

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят канд. геол.-мин. наук Фролову Наталью Сергеевну и Корбутяк Анну Николаевну — ведущего и научного сотрудников кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова за возможность участия в лабораторных опытах по моделированию сдвига, которые позволили уточнить используемые в работе модели формирования парагенезиса оперяющих магистральный разрыв трещин. Также авторы признательны заведующему лабораторией тектонофизики ИФЗ РАН докт. физ.-мат. наук Ребечко Юрию Леонидовичу за критические замечания по реализации методики. Помимо прочего, авторы благодарны старшему научному сотруднику лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН канд. геол.-мин. наук Черемных Александру Викторовичу за детальное рецензирование и многочисленные ценные замечания, которые учтены при подготовке статьи к печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров В.К.* Надвиговые и шарьяжные структуры Прибайкалья. Новосибирск: Наука. 1990. 103 с.
- Аржанникова А.В., Гофман Л.Е.* Проявление неотектоники в зоне влияния Приморского разлома // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 6. С. 811–818.
- Борняков С.А., Семинский К.Ж., Буддо В.Ю., Мирошниченко А.И., Черемных А.В., Черемных А.С., Тарасова А.А.* Основные закономерности разломообразования в литосфере и их прикладные следствия (по результатам физического моделирования) // Геодинамика и тектонофизика. 2014. № 5(4). С. 823–861.
- Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 536 с.
- Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Ларионов А.Н., Сергеев., С.А.* Ольхонский метаморфический террейн Прибайкалья: раннепалеозойский композит фрагментов неопротерозойской активной окраины // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 571–588.
- Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Скляр Е.В., Лавренчук А.В., Лепехина Е.Н.* Фрагмент раннепалеозойской (500 млн лет) островной дуги в структуре Ольхонского террейна (Центрально-Азиатский складчатый пояс) // Докл. РАН. 2014. Т. 457. № 4. С. 429–433.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист N-48 — Иркутск. Объяснительная записка / Под ред. Е.П. Миронюка. СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ. 2009. 574 с.
- Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Чо М., Чонг В., Ким Д.* Синметаморфические гранитоиды (~ 490 млн лет) — индикаторы аккреционной стадии в эволюции Ольхонского террейна (Западное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 10. С. 1543–1561.
- Зорин Ю.А., Скляр Е.В., Беличенко В.Г., Мазукабзов А.М.* Механизм развития системы островная дуга — задуговой бассейн и геодинамика Саяно-Байкальской складчатой области в позднем рифее — раннем палеозое // Геология и геофизика. 2009. № 3. С. 209–226.
- Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М.* Формализованный линеаментный анализ геологических структур Прибайкалья // Физика Земли. 2021. № 5. С. 223–234.
- Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф.* Основы линеаментной тектоники. М.: Недра. 1986. 144 с.
- Корбутяк А.Н., Фролова Н.С., Мишакина А.А.* Физическое моделирование структурообразования в осадочном чехле над разломом фундамента. Сопоставление с эшелонированными нефтегазоносными валлообразными поднятиями севера Западно-Сибирской плиты // Картографик. 2018. № 3 (285). С. 57–67.
- Кузьмин Ю.О.* Современные аномальные деформации земной поверхности в зонах разломов: сдвиг или раздвиг? // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 967–987.
- 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.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н.* Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. Новосибирск: Академическое 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. Параметры сейсмико-тектонических деформаций земной коры Байкальской рифтовой зоны по сейсмологическим данным // Докл. РАН. 2007. Т. 416. № 4. С. 543–545.
- Мишарина Л.А., Солоненко Н.В. Механизм очагов и поле тектонических напряжений. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы. Наука. 1977. С. 71–78.
- Обухов С.П., Ружич В.В. Структура и положение Приморского сбросо-сдвига в системе главного разлома Западного Прибайкалья // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири. Иркутск: ИЗК СО РАН. 1971. С. 65–68.
- Парфеевец А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В. Эволюция напряженного состояния земной коры Монголо-Байкальского подвижного пояса // Тихоокеанская геология. 2002. Т. 21. № 1. С. 14–28.
- Петров В.А., Мострюков А.О., Васильев Н.Ю. Структура современного поля напряжений мезозойско-кайнозойского цикла деформации Байкальской рифтовой зоны // Геофизические исследования. 2008. Т. 9. № 3. С. 39–61.
- Петров В.А., Сим Л.А., Насимов Р.М., Шукин С.И. Разломная тектоника, неотектонические напряжения и скрытое урановое оруденение в районе Стрельцовой кальдеры // Геология рудных месторождений. 2010. Т. 52. № 4. С. 310–320.
- Плешанов С.П., Чернов Ю.А. О генетической связи кайнозойских разрывных нарушений западного Прибайкалья с разломами докембрийского заложения // Вопросы геологии Прибайкалья и Забайкалья. 1971. С. 51–54.
- Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС. 2017. 235 с.
- Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Новосибирск: изд-во СО РАН. Филлиал “Гео”. 2003. 244 с.
- Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Чермных А.В., Постеева Е.В., Бобров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Потапов В.В., Бурзунова Ю.П. Межблоковые зоны северозападного плеча Байкальского рифта: результаты комплексных геологогеофизических исследований по профилю п. Баяндай — м. Крестовский // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 2. С. 250–269.
- Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Чермных А.В., Постеева Е.В., Бобров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Потапов В.В., Зарипов Р.М., Чермных А.С. Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной Сибири: тектонофизическая интерпретация геологогеофизических данных // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 3. С. 203–278.
- Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1. Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 445–467.
- Скляров Е.В., Федоровский В.С., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М., Старикова А.Е. Инъекционные карбонатные и силикатно-карбонатные комплексы в коллизионных системах на примере Западного Прибайкалья // Геотектоника. 2013. № 3. С. 58–77.
- Федоровский В.С., Владимиров А.Г., Хаин Е.В. Тектоника и магматизм коллизионных зон каледонид Центральной Азии // Геотектоника. 1995. № 3. С. 3–22.
- Федоровский В.С. Купольный тектогенез в коллизионной системе каледонид Западного Прибайкалья // Геотектоника. 1997. № 6. С. 56–71.
- Фролова Н.С., Кара Т.В., Читалин А.Ф., Чернецкий А.Г. Аналоговое моделирование сложных сдвиговых зон. Пример Баимской рудной зоны (западная Чукотка). Проблемы тектоники континентов и океанов: Материалы LI-го Тектонического совещания. 2019. С. 320–324.
- Чермных А.В. Разломно-блоковое строение земной коры и напряженное состояние в зонах региональных разломов восточного побережья озера Байкал // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 2. С. 250–258.
- Чермных А.В. Поля напряжений в зоне Приморского сброса (Байкальский рифт) // Литосфера. 2011. № 1. С. 135–142.
- Чермных А.В., Гладков А.С., Чермных А.С. Экспериментальное исследование формирования сети разрывов Накынского поля Якутской алмазоносной провинции // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 1. С. 66–82.
- Чермных А.В., Чермных А.С., Бобров А.А. Морфоструктурные и структурно-парагенетические особенности разломных зон Прибайкалья (на примере Бугульдейского дизъюнктивного узла) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 9. С. 1372–1383.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука. СО АН СССР. 1983. 110 с.
- Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука. 1989. 158 с.
- Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Гео. 2014. 359 с.
- Anders M.H., Wiltschko D.V. Microfracturing, paleostress and the growth of faults // J. Struct. Geol. 1994. V. 16. № 6. P. 795–815.
- Anderson E.M. The dynamics of faulting // Transactions of the Edinburgh Geological Society. 1905. № 8. P. 387–402.
- Arzhannikova A., Arzhannikov S.G. Morphotectonic and paleoseismological studies of Late Holocene deformation along the Primorsky Fault, Baikal Rift // Geomorphology. 2019. V. 342. P. 140–149.
- Brink U.S., Taylor M.H. Crustal structure of central Lake Baikal: insights into intracontinental rifting // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № B7. <https://doi.org/10.1029/2001JB000300>
- Cheremnykh A.V., Burzunova Yu.P., Dekabryov I.K. Hierarchic features of stress field in the Baikal region: Case study of the

- Buguldeika Fault Junction // *Journal of Geodynamics*. 2020. V. 141–142. P. 101797.
- Delvaux D., Moeys R., Stapel G., Melnikov A., Ermikov V.* Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part I: Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution // *Tectonophysics*. 1995. V. 252. № 1. P. 61–101.
- Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnichenko A., Ruzhich V., San'kov V.* Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II: Cenozoic rifting // *Tectonophysics*. 1997. V. 282. № 1. P. 1–38.
- Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Cho M., Sergeev S.A., Demonterova E.I., Mazukabzov A.M., Lepkhina E.N., Cheong W., Kim J.* Pre-collisional (0.5 Ga) complexes of the Olkhon terrane (southern Siberia) as an echo of events in the Central Asian Orogenic Belt // *Gondwana Res.* 2017. 42. P. 243–263.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.016>
- Enoh M.A., Okeke F.I., Okeke U.C.* Automatic lineaments mapping and extraction in relationship to natural hydrocarbon seepage in Ugwueme, South-Eastern Nigeria // *Geod. Cartogr.* 2021. V. 47. P. 34–44.
- Faulkner D.R., Mitchell T.M., Jensen E., Cembrano J.* Scaling of fault damage zones with displacement and the implications for fault growth processes // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2011. V. 116. № 5. P. 1–11.
- Faulkner D.R., Sanchez-Roa C., Boulton C., den Hartog, S.A.M.* Pore fluid pressure development in compacting fault gouge in theory, experiments, and nature // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2018. V. 123. № 1. P. 226–241.
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Wingate M.T.D., Poller U., Kröner A., Fedorovsky V.S., Mazukabzov A.M., Todt W., Pisarevsky S.A.* Petrology, geochronology, and tectonic implications of ca. 500 Ma metamorphic and igneous rocks along the northern margin of the Central-Asian Orogen (Olkhon terrane, Lake Baikal, Siberia) // *J. Geol. Soc. Lond.* 2008. V. 165. P. 235–246.
<https://doi.org/10.1144/0016-76492006-125>
- Hancock P.L.* Brittle microtectonics: principles and practice // *J. of Struct. Geol.* 1985. V. 7. № 3/4. P. 437–457.
- Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J.T., Sampson C.C., Neal J.C.* A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environmental Research Letters*. 2022. V.17. № 2. P. 24016.
- Hobbs W.H.* Lineaments of the Atlantic Border Region // *Geological Society. American Bulletin*. 1904. V. 15. P. 483–506.
- Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M., Cheremnykh A.V.* Some Possibilities of Lineament Analysis in Mapping Faults of Different Ranks: Case Study of the Baikal Region // *Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physic*. 2022. V. 58. № 9. P. 1086–1099.
<https://doi.org/10.1134/S0001433822090092>
- Jolivet M., De Boisgrollier T., Petit C., Fournier M., Sankov V.A., Ringenbach J.-C., Byzov L., Miroshnichenko 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. P. TC3008.
<https://doi.org/10.1029/2008TC002404>
- Lunina O.V., Gladkov A.S., Cheremnykh A.V.* Fracturing in the Primorsky fault zone (Baikal Rift system) // *Russ. Geol. Geophys.* 2002. V. 43. № 5. P. 446–455.
- Mats V.D., Lobatskaya R.M., Khlystov O.M.* Evolution of faults in continental rifts: morphotectonic evidence from the south-western termination of the North Baikal basin // *Earth Science Frontiers*. 2007. V. 14. № 1. P. 207–219.
- Mats V.D., Perepelova T.I.* A new perspective on evolution of the Baikal Rift // *Geosci. Front.* 2011. V. 2. № 3. P. 349–365.
- Petit C., Déverchère J.* Structure and evolution of the Baikal rift: a synthesis // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2006. V. 7. № 11. P. Q11016.
<https://doi.org/10.1029/2006GC001265>
- San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., Levi K.G., Likhnev A., Melnikov A.I., Delvaux D.* Cenozoic stress field evolution in the Baikal rift zone // *Bulletin du Centre de Recherches Elf Exploration Production*. 1997. V. 21. № 2. P. 435–455.
- Wilson J.E., Chester J.S., Chester F.M.* Microfracture analysis of fault growth and wear processes, Punchbowl Fault, San Andreas System, California // *J. Struct. Geol.* 2003. №. 25. P. 1855–1873.
- Zlatopolsky A.A.* Program LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) automated linear image features analysis — experimental results // *Computers & Geoscience*. 1992. V. 18. № 9. P. 1121–1126.

Reconstruction of Parameters of Shear Stresses During the Formation of Multi-Rank Faults in the Western Baikal Region Based on Tectonophysical Interpretation of Lineaments

A. D. Svecherevskiy^{a, *}, S. A. Ustinov^{a, b}, D. S. Lapaev^a, and V. A. Petrov^a

^a*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**e-mail: alexey@svecherevskiy.ru*

Received November 11, 2024; revised December 2, 2024; accepted December 25, 2024

Abstract — The author's software made it possible to perform a detailed identification of lineaments at various scale levels for the region of the Obruchev fault system of the western Baikal region. The identified lineaments significantly complement the mapped framework of faults and are consistent with the strike of fault structures of the corresponding rank. Based on the analysis of the relative specific density of lineaments of the local scale level, reflecting the feathering megacracks of large faults, heterogeneous zones of dynamic influence of regional structures were established, which were divided into relatively homogeneous segments. For each identified segment and each structure as a whole, using the developed software "Lineament Stress Calculator", a reconstruction of shear stress parameters was carried out using the P.L. Hancock's model. It has been previously proven that the main features of the Early Paleozoic stage of the region development during the accretion of the Olkhon terrane to the southern margin of the Siberian craton were accompanied by activation of right-lateral strike-slip displacements along the SW-NE accretionary sutures and active metamorphism processes. The obtained results confirm that the main faults of the SW-NE strike, subparallel to the marginal suture of the Siberian platform, were formed at the early stage of their development as right-lateral strike-slips with the compression axis orientation of $\approx 90^\circ$. Second-order faults of the NW-SE orientation are defined as left-lateral strike-slips and were probably formed at that time as antithetical shears in relation to the main structures, having received their development during further structural rearrangements of the region.

Keywords: lineament analysis, structural-tectonophysical analysis, stress-strain state, stress-strain field, shear model, fault, western Baikal region