

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА ПРИ КАРТИРОВАНИИ РАЗНОРАНГОВЫХ РАЗЛОМОВ (НА ПРИМЕРЕ ПРИБАЙКАЛЬЯ)

© 2022 г. Г. Н. Иванченко^а, Э. М. Горбунова^{а, *}, А. В. Черемных^б

^аИнститут динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

^бИнститут земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: emgorbunova@bk.ru

Поступила в редакцию 02.10.2021 г.

В работе представлены результаты линеаментного анализа Прибайкалья (юго-западная часть) с использованием методов визуального дешифрирования цифровых моделей рельефа (ЦМР), топографических карт масштаба 1 : 100000 и 1 : 25000 и формализованной (компьютерной) обработки космических снимков, ЦМР на основе программного пакета LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis). Выполнено детальное сопоставление результатов визуального и компьютерного анализа протяженных линеаментов и статистических полей малых линеаментов цифровых изображений с особенностями разломно-блоковой структуры в пределах Прибайкалья. Показана информативность комплексирования использованных методов дистанционного зондирования района исследований при картировании разноранговых разломов на территориях, характеризующихся разной тектонической активностью. По результатам линеаментного анализа предложены способы обработки дистанционных материалов и топографических карт, позволяющие уточнять положение разноранговых разломов при геологическом картировании как геодинамически активных областей (Байкальская рифтовая система), так и относительно стабильных территорий (Сибирская платформа). Основные параметры разноранговых разломов заверены полевыми наблюдениями на ключевых участках.

Ключевые слова: разломные зоны, линеаменты, компьютерное дешифрирование, Байкальский рифт, розы-диаграммы, стадии формирования разломов

DOI: 10.31857/S020596142203006X

ВВЕДЕНИЕ

Со времен введения У. Хоббсом термина линеамент прошло уже более 100 лет, за которые анализ линейных элементов ландшафта стал важнейшим инструментом оперативного получения новых знаний о разломах и сопутствующих их формированию процессах. В настоящее время, с помощью визуального линеаментного анализа не только картируют разломы различных рангов, в том числе рудоконтролирующие и рудовмещающие (Гаврилов, 2020; Куприков, Викентьев, 2019; Миловский, Беляков, 2019 и др.), но и выделяют их зоны влияния и составляют зонно-блоковые схемы исследуемых территорий (Семинский и др., 2012). Полученные результаты применяются при реконструкции полей тектонических напряжений (Семинский, Семинский, 2016; Сим и др., 2018; Черемных и др., 2018 и др.).

В конце 80-х годов прошлого века развитие информационных технологий и увеличение объема информации вызвало необходимость компьютеризации процесса дешифрирования и интер-

претации данных дистанционного зондирования (Автоматизированный..., 1988; Короновский и др., 1986; Иванченко, 1991; Zlatopolsky, 1992). Появились работы, посвященные частичной и полной формализации процесса. Преимущества формализованного анализа заключаются в обеспечении оперативности и повторяемости результатов при изучении структурно-геологических условий. Методика может быть наиболее востребована при проведении поисковых и разведочных работ в труднодоступных и недостаточно изученных районах. В пределах относительно однородного ландшафта и при малой антропогенной нагрузке линеаментам соответствуют преимущественно активные на неотектоническом этапе разрывы, зоны повышенной трещиноватости и локализации деформаций.

Формализованное дешифрирование космоснимков с низким уровнем разрешения, которые находятся в открытом доступе, позволяет оперативно анализировать геодинамическую обстановку территории исследований на регио-

нальном уровне. Для заверки на местности результатов линеаментного анализа выбираются опорные участки, в пределах которых могут быть выполнены детальные геологические изыскания, включающие картирование основных систем трещиноватости и разрывных нарушений.

Компьютерный (формализованный) линеаментный анализ результатов мониторинга сейсмоактивных территорий по данным обработки дистанционных материалов во временной динамике с использованием программного пакета LESSA позволяет выделять геодинамические предвестники землетрясений (Бондур, Зверев, 2005; Гапонова и др., 2019; Бондур, Гапонова, 2021 и др.). В условиях платформ формализованное дешифрирование космоснимков направлено на прослеживание скрытых глубинных разломов фундамента на разных иерархических уровнях, которые в виде рассеянных зон трещиноватости транслируются через чехол на поверхность в виде линеаментов (Анисимова, Короновский, 2007; Иванченко, Горбунова, 2011).

Линеаментный анализ позволяет получать важные данные о разломах, активных на неотектоническом этапе развития территории исследований. В Прибайкалье этот этап охватывает интервал времени после эпохи пенепленизации, в результате которой сформировалась мел-палеогеновая поверхность выравнивания. Разрывные деформации, активные после этого времени, наиболее хорошо выражены в линейных элементах ландшафта, в связи с чем линеаментный анализ является эффективным инструментом их изучения.

В рамках проведенных исследований линеаментных структур юго-западной части Прибайкалья было применено формализованное (компьютерное) интерактивное дешифрирование цифровых моделей рельефа (ЦМР) и космоснимков с использованием программного пакета LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) (Златопольский, 2008). На основе ЦМР анализируется рельеф, образованный на новейшем этапе (плиоцен-четвертичный). Космические снимки отражают интегральную картину структур, сформированных в процессе геологического развития региона. Синхронное дешифрирование космоснимков и ЦМР направлено на выделение в ландшафте морфоструктур разного геологического возраста, сформировавшихся под воздействием различных полей тектонических напряжений.

Цель работ заключалась в исследовании структурного рисунка области сочленения Сибирской платформы и Байкальской рифтовой системы и определении особенностей разноранговых разломов на основе совместного формализованного и визуального линеаментного анализа космоснимков, ЦМР и топографических карт.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Исследования проведены в Прибайкалье (юго-западная часть), на территории охватывающей юго-восточный край Сибирской платформы и прилегающую к нему часть Центрально-Азиатского подвижного пояса, на границе которых в кайнозойе формируется Байкальская рифтовая система. Этот район интересен тем, что в непосредственной близости расположена относительно стабильная область Сибирской плиты, ее реактивированная окраина на границе с Центрально-Азиатским подвижным поясом, и собственно неотектонически активный пояс. Именно к этой границе приурочена активная в кайнозойе рифтовая система, наиболее крупный элемент которой – Байкальский рифт расположен в юго-восточной части района исследований. Здесь, в пределах северо-западного крыла рифта, располагается Обручевская система разломов (рис. 1), которая включает достаточно хорошо изученные Ангаро-Бугульдейский (Мац и др., 2001), Приморский (Шерман, Днепровский, 1989; Лунина и др., 2002), Ольхонский по (Delvaux et al., 1997) (он же Морской по (Agar and Klitgord, 1995) разломы, а также менее известные Прихребтовый (Семиинский и др., 2012), Бугульдейский (Mats et al., 2007) и Куртунский (Черемных и др., 2018; Cheremnykh et al., 2020) дизъюнктивы. Кроме того, в пределах Сибирской платформы известны такие крупные разломы как Предбайкальский (Семиинский и др., 2012) и Жигаловский (Леви и др., 1996). Для изучения этих разноранговых и по-разному выраженных в рельефе дизъюнктивов были использованы следующие методические приемы линеаментного анализа.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Набор методов линеаментного анализа был обусловлен не только необходимостью картирования всех обозначенных выше известных разломов Прибайкалья, но и возможностью анализа по дистанционным данным ширины зоны влияния и стадии формирования каждого дизъюнктива. Для анализа линеаментных структур Прибайкалья было применено два метода: визуальное дешифрирование ЦМР и топографических карт (Черемных и др., 2018), и формализованное (компьютерное) интерактивное дешифрирование космоснимков и ЦМР с использованием программного пакета LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) (Златопольский, 2008, 2020).

Визуальное дешифрирование

Визуальный линеаментный анализ для территории Прибайкалья проводился многими исследователями (Кузьмин, 1995; Аржанникова, Гоф-



Рис. 1. Основные разломы района исследований.

ман, 2000; Семинский и др., 2012; Лунина, 2016; Черемных и др., 2018 и др.). Приведенные ниже исследования выполнены по методике, изложенной в работе (Черемных и др., 2018). Для выделения крупных линеаментов использовались ЦМР на основе SRTM, находящиеся в свободном доступе сети Internet и имеющие разрешение ~90 м. Линейные элементы рельефа выделялись как вытянутые в плане уступы горных хребтов, спрямленные участки речных долин и русел рек. Иногда наблюдались смещения русел рек или горных хребтов, отображающие линеаменты сдвигового кинематического типа. В результате визуального линеаментного анализа с использованием ЦМР

выделены линейные элементы ландшафта с детальностью сопоставимой с результатами анализа по топографическим картам масштаба 1 : 100000, где сплошные горизонталы проведены через 20 м. Основой для проведения анализа на детальных участках служили топографические карты масштаба 1 : 25000, как наиболее крупномасштабные доступные нам материалы. На таких картах сплошные горизонталы проведены через 5 м. Количественный характер информации о рельефе на ЦМР и топографических картах разного масштаба позволяет оценить высоту уступов или горизонтальные смещения элементов рельефа, что служит дополнительной информацией о кинема-

тическом типе разлома, отождествляемого с конкретным линеamentом. Кроме того, для выявления линеamentов, выраженных в рельефе горных стран, возможно применение количественных показателей элементов рельефа, подобно методике, изложенной в монографии Е.Я. Ранцман (1979). Ранее были выделены линейные элементы ландшафта (Черемных и др., 2018): хорошо выраженные в рельефе — тектонические уступы со значительным изменением высот, линеamentы, смещающие русла рек и временных водотоков, конусы выноса, водоразделы или хребты. Также выделялись и слабо проявленные линеamentы — линейные элементы речных долин без смещения русла или линейно вытянутые уступы, характеризующиеся небольшими, но достаточными для уверенного картирования превышениями рельефа.

Таким образом, по данным обработки ЦМР и топографических карт разного масштаба выполнено визуальное картирование линеamentов по рисунку гидросети и характеру рельефа с учетом их количественных параметров. Разномасштабные топоосновы и ЦМР позволили откартировать как крупные линеamentы, так и непротяженные линейные элементы рельефа (далее по тексту малые линеamentы), осложняющие внутреннюю структуру разломных зон и вычленяемых ими блоков. В пределах известных разломных зон зафиксированы протяженные линеamentы — магистральные сместители разломов или их сегменты. Наличие или отсутствие в пределах разломной зоны магистрального сместителя связано со стадией формирования дизъюнктива, так как любой разлом развивается последовательно на трех дизъюнктивных стадиях (Seminsky, 2012): ранней дизъюнктивной, поздней дизъюнктивной и стадии полного разрушения. На ранней дизъюнктивной стадии в разломной зоне наблюдаются лишь непротяженные разрывы, опережающие формирование основного разлома. Поздняя дизъюнктивная стадия характеризуется более протяженными разрывами — будущими сегментами магистрального сместителя разлома. Со стадией полного разрушения отождествляется формирование магистрального шва дизъюнктива. Таким образом, по результатам линеamentного анализа возможно не только картирование разрывных нарушений, но определение стадии развития наиболее крупных дизъюнктивов и оконтуривание зон их динамического влияния (Шерман и др., 1983). Последнее возможно путем дополнительных построений карт плотности линейных элементов, отождествляемых нами с ранноранговыми разрывами, генетически связанными с образованием основного разлома (структурный парагенез).

Компьютерное дешифрирование

Этот вид анализа проведен с использованием программного комплекса LESSA, возможности которого детально изложены в статьях (Златопольский, 2008, 2020) и монографии (Иванченко, Горбунова, 2015). Технология позволяет автоматизировано выделять малые линеamentы и анализировать их пространственное распределение. Малые линеamentы используются для построения протяженных линеamentов. Под линеamentами понимаются ориентированные линейные элементы изображения, связанные с неоднородностями ландшафта.

Данная технология применима для разных типов изображений, включая черно-белые космоснимки, цифровые модели рельефа, лидарные съемки и геофизические поля (тепловые, радиолокационные, магнитные). Главным достоинством формализованного дешифрирования является воспроизводимость результатов обработки изображений при повторении параметров работы программы. Основная методическая трудность — правильный подбор параметров, отвечающий, как структуре изображения, так и практическим целям исследования.

Основным инструментарием программного пакета LESSA являются протяженные линеamentы на разных порогах выраженности, поля общей плотности и отдельно по 8 основным направлениям, статистически достоверные линии вытянутости роз-диаграмм малых линеamentов (структурные линии). Применительно к объекту исследований — юго-западной части Прибайкалья были подобраны черно-белые космоснимки Landsat с генерализованным разрешением ~100 м и ЦМР, построенная на базе SRTM съемки с генерализованным разрешением ~90 м. Обработка космоснимков и ЦМР проводилась методом подбора порога выраженности, который наиболее полно отражает иерархическую соподчиненность выделяемых линейных структур региона. На выбранном, в нашем случае, высоком пороге выраженности > 150 выделены протяженные линеamentы, которые трассируют основные глубинные разломы, обычно совпадающие с результатами геологического картирования.

На более низких порогах выраженности линеamentный рисунок соотносится с разными типами и рангами разломов и может быть использован для построения роз-диаграмм по направлениям. Выделение 20 “старших” (наиболее выраженных в данном направлении) протяженных линеamentов по каждому из 8 направлений статистически уравнивает все направления и искусственно подавляет преобладающую в пределах Байкальского рифта северо-восточную систему разломов. При анализе роз-диаграмм протяженных линеamentов мы использовали качественные, а не ко-

личественные сравнения с учетом особенностей методики LESSA, продемонстрированных на примере ЦМР этого района (Златопольский, 2020).

Для получения объективной картины геологического строения региона исследовались все поля плотности малых линеаментов, среди которых были выбраны характерные, геодинамически обусловленные поля плотности линеаментов северо-восточного и северо-западного направлений. При анализе роз-диаграмм устанавливается их вытянутость (вектор приведенной результирующей длины) в пределах заданного скользящего окна. Линии вытянутости, соединяющие соседние вектора, группируются в компактные прямолинейные или плавно изогнутые зоны разной ширины и протяженности. Полученные структурные линии часто могут быть интерпретированы как направления слоистости, зоны сгущения трещиноватости, локализации деформаций или другие виды неоднородности природной среды.

Оптимизация параметров интерактивного режима дешифрирования с использованием формализованного линеаментного анализа позволяет интерпретировать результаты в стандартных терминах строения геолого-геофизической среды. Программный комплекс LESSA обладает большой вариативностью параметров интерактивного выделения малых и протяженных линеаментов для решения геолого-геофизических задач, что обеспечивает повторяемость результатов и существенно сокращает время их получения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ЛИНЕАМЕНТНЫХ СТРУКТУР ПРИБАЙКАЛЬЯ

Применение линеаментного анализа на региональном уровне направлено на прослеживание связи структурного рисунка линеаментов с геологическим строением, геодинамикой региона и возрастом кайнозойской активизации соответствующих дизъюнктивов. Этот уровень удобен для определения стадии формирования дизъюнктива. На локальном уровне дешифрирование линейных элементов ландшафта позволяет исследовать внутреннее строение разломов и блоков, а также определять ширину зон разломов. Далее рассмотрим результаты применения охарактеризованных выше методических приемов на разных масштабных уровнях.

Региональный уровень

Результаты визуального анализа линеаментов на ЦМР приведены на рис. 2, где хорошо видна различная выраженность данных структур в пределах границ Байкальского рифта и на сопредельной территории Сибирской платформы. Наиболее протяженные линеаменты соответствуют из-

вестным крупным разломам северо-западного крыла Байкальского рифта. Это Приморский разлом, который вместе с Тырганским образует Бугульдейско-Чернорудский грабен (см. рис. 2), протягивающийся от пос. Бугульдейка до залива Мухор оз. Байкал (Mats et al., 2007).

Также хорошо выражен в рельефе Сибирской платформы крупный Жигаловский разлом. Эти и некоторые другие разломы региона (такие как Ольхонский, Бугульдейский) находятся на стадии сформированного магистрального сместителя. Линеаментный анализ позволил точнее закартировать и некоторые разломы, “переживающие” позднюю дизъюнктивную стадию развития, такие как Прихребтовый и Предбайкальский разломы, выраженные полосой линеаментов протяженностью первые десятки километров (см. рис. 2).

Ширина полосы может быть установлена путем оконтуривания линеаментов, образующих выявленную полосу, соответствующую зоне динамического влияния разломов. Однако, установление мощности зон этих разломов затруднительно. Более вероятно решение этой задачи при укрупнении масштаба исследования, которое позволяет картировать в пределах зон крупных разломов менее протяженные разрывы второго и последующих порядков. Такая задача решена на локальном уровне, что будет показано далее.

Компьютерный линеаментный анализ космоснимков на региональном уровне позволил получить следующие результаты (рис. 3). Так, на высоком пороге выраженности линеаментов >150 трассируются основные разломы, активные в плиоцен-четвертичное время (Лунина, 2016). Этим автором при визуальном дешифрировании использованы цифровые модели рельефа SRTM 90 м (Consortium for Spatial Information, 2004), космические снимки со спутников серии “Landsat” (Google Earth). Даже на мелкомасштабных космоснимках, находящихся в открытом доступе, уверенно выделяются такие крупные разломы как Жигаловский, Приморский, Ангаро-Бугульдейский, Ангарский и Предбайкальский. Некоторые из них характеризуются не единым сместителем, а протяженной полосой близкорасположенных малых линеаментов. Так, на схеме компьютерного дешифрирования космоснимка, система Предбайкальского прогиба выделяется сложнопостроенной протяженной зоной ЮЗ–СВ направления, согласной с простираемостью прогиба. Вдоль долины реки Ангары тоже прослеживается сложнопостроенная зона, представленная протяженным субмеридиональным линеаментом и опережающим линеаментом СЗ–ЮВ простираения (рис. 3, а).

На схеме формализованного дешифрирования ЦМР с порогом выраженности линеаментов >140 субмеридиональная система протяженных линеаментов (рис. 3, б) соответствует границе мегали-

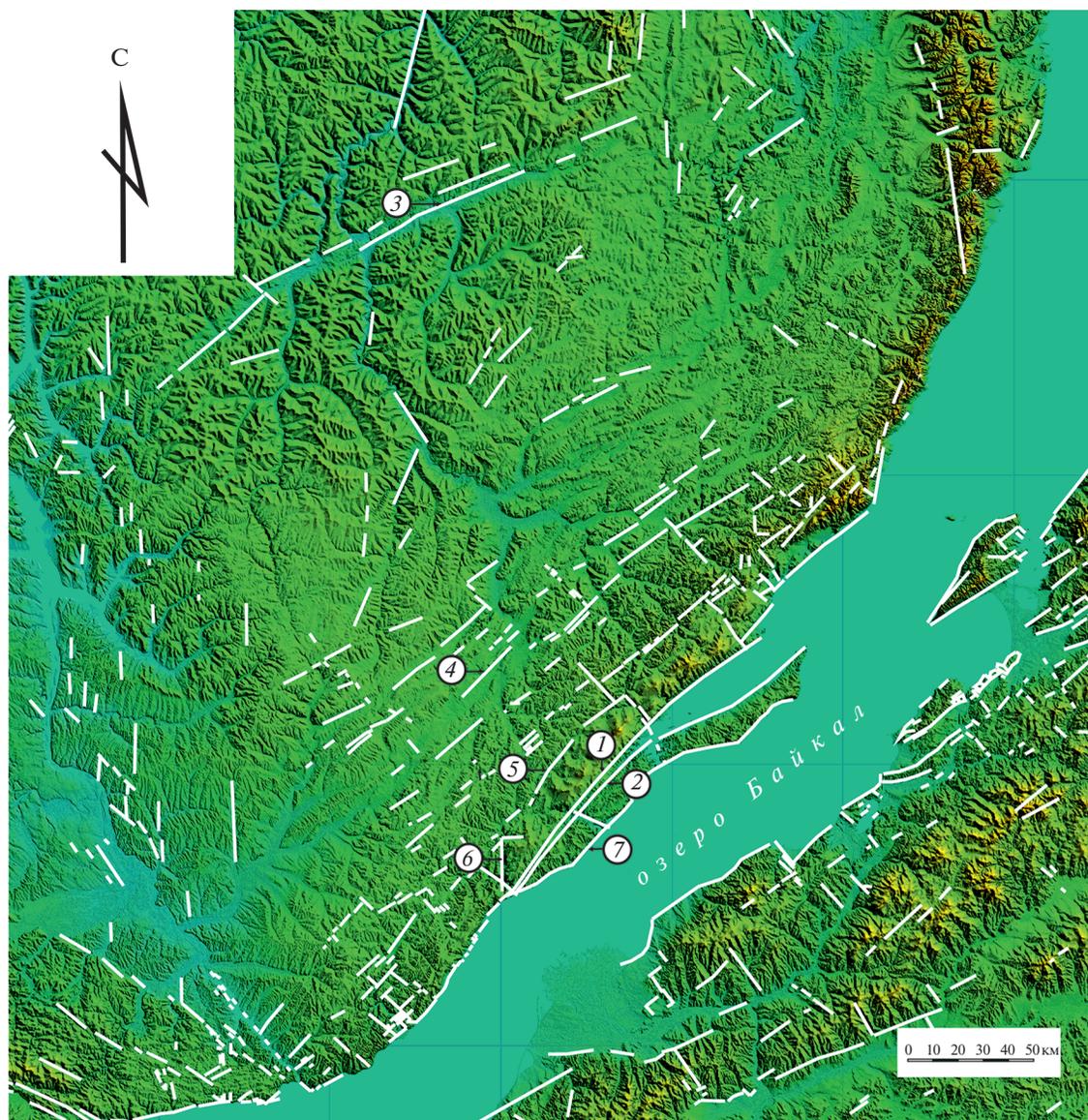


Рис. 2. Результаты визуального линейментного анализа ЦМР. Линейменты, соответствующие разломам: 1 – Приморскому, 2 – Тырганскому, 3 – Жигаловскому, 4 – Предбайкальскому, 5 – Прихребтовому, 6 – Бугульдейскому, 7 – Ольхонскому.

тосферных блоков, выделенной ранее как Трансазиатский линеймент 105° (Драгунов, 1965) и подтвержденной в настоящее время геофизическими данными (Гатинский и др., 2020).

Уменьшение порога выраженности линейментов до >120 позволяет по тем же космоснимкам выделить больше линейментов (рис. 4). В юго-восточной части территории, приуроченной к плечу Байкальского рифта, прослеживается система протяженных линейментов ЮЗ–СВ простирающихся (рис. 4, а). На северо-западе выделяется решетчатый рисунок, характеризующий сеть разрывов Сибирской платформы. Различный линейментный рисунок, по-видимому, отражает распро-

странение деформаций в “тело” платформы со стороны подвижного пояса.

На розе-диаграмме (рис. 4, а сверху слева), отражающей статистическое распределение протяженных линейментов, преобладает ЮЗ–СВ (байкальское) направление. Следующим по выраженности является субширотное направление, а субмеридиональное – подавлено. На ЦМР линейменты траассируют более молодые преимущественно четвертичные линейные структуры, поскольку развитый эрозионный рельеф возник при и после разрушения миоценовой поверхности выравнивания (рис. 4, б). Преобладающее распространение получают протяженные линей-

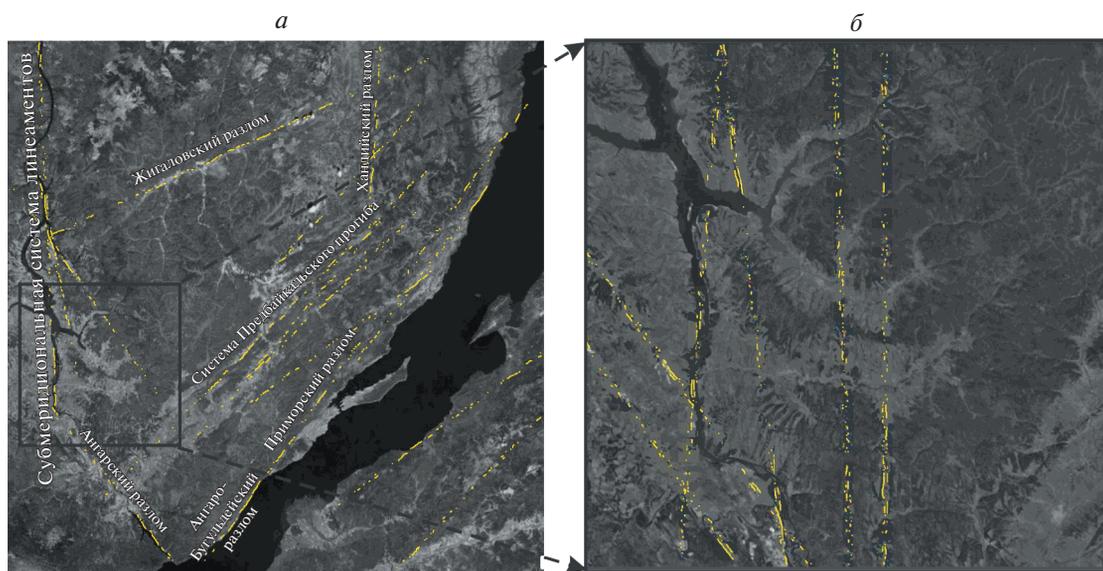


Рис. 3. Схемы формализованного дешифрирования с порогом выраженности линеементов >150 (а) и >140 (б).

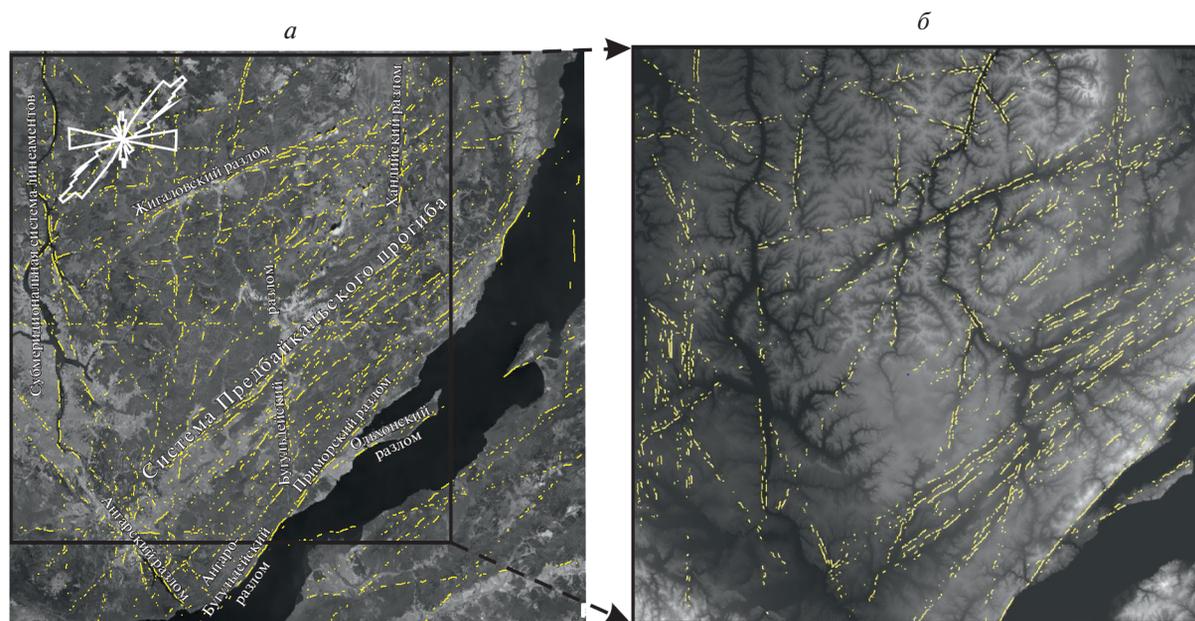


Рис. 4. Схемы формализованного дешифрирования космоснимка (а) и ЦМР (б) с порогом выраженности линеементов >120 .

менты СВ и субмеридионального направлений. Ширина Предбайкальского прогиба увеличивается в направлении на СВ, что сопровождается развитием серии протяженных линеементов СВ простирания. В западной части ЦМР отчетливо прослеживается система субмеридиональных протяженных линеементов.

Роза-диаграмма, построенная для такой обширной территории, охватывающей как часть Сибирской платформы, так и значительную область подвижного пояса, отражает разновремен-

ные наложенные разрывные деформации. Для исключения деформаций, явно вызванных влиянием со стороны подвижного пояса, был применен имеющийся в программном комплексе LESSA инструментарий. Была построена схема автоматизированного дешифрирования космоснимка для 20 “старших” линеементов по 8 направлениям (рис. 5). Таким образом, проявляются все направления, которые статистически значимо выражены на космоснимке. Результат такой

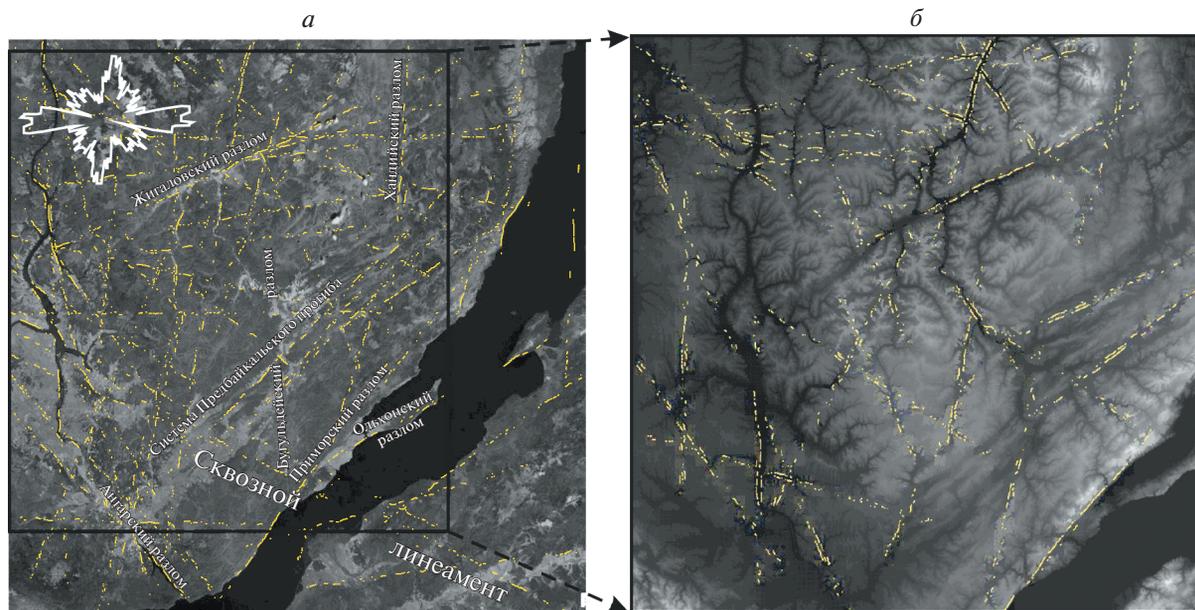


Рис. 5. Схемы формализованного дешифрирования космоснимка (а) и ЦМР (б) для 20 “старших” линеаментов по 8 направлениям.

операции отражен на общей розе-диаграмме (рис. 5, а вверху слева).

Необходимо отметить, что при данном подходе искусственного подавления преобладающего, доминирующего СВ и некоторых других направлений выделяются ортогональные системы протяженных линеаментов субширотного и субмеридионального направлений, что, вероятно, свидетельствует об их связи с более древней (доплиоценовой?) структурой региона. Кроме того, подавление доминирующего направления способствовало выявлению Сквозного линеамента (линеamentной зоны, состоящей из 3 субпараллельных линеаментов), прослеженного на северо-западном и юго-восточном побережьях оз. Байкал (рис. 5, а). Подобные дизъюнктивные структуры, ортогональные к основным разломам байкальского (северо-восточного) направления, охарактеризованы в работах (Хренов, 1971; Мац и др., 2001 и др.). Примененный нами инструментальный программный комплекс LESSA позволил проследить Сквозную линеamentную зону не только в окрестностях Байкальского рифта, но и на значительном удалении от него – в пределах Сибирской платформы и Забайкалья.

На ЦМР, обработанной по методу выделения 20 “старших” линеаментов, сохраняются все направления при уменьшении общего количества выделенных молодых линеаментов (рис. 5, б). Система субширотных протяженных линеаментов прослеживается в северной части рассматриваемой ЦМР, которая соответствует южной части Сибирской платформы. Эти структуры, по-види-

мому, являются более ранними, по сравнению с северо-восточными, обусловленными взаимодействием платформы и подвижного пояса.

По результатам цифровой обработки космоснимка наряду с протяженными линеаментами были выделены структурные линии (линии вытянутости роз-диаграмм малых линеаментов), часто представляющие собой линии неоднородности геологических свойств среды (зоны локализации деформаций, зоны сгущения трещиноватости и др.) (рис. 6).

Рисунок этих линий является производной как преобладающего направления малых линеаментов, так и их пространственного расположения, что соответствует зонно-блоковому строению рассматриваемого региона. Межблоковые зоны представлены сгущением структурных линий и основными протяженными линеаментами, выделяемыми на ЦМР (рис. 6. б). Сопоставление схемы иерархии зонно-блоковой структуры Прибайкалья (Семинский и др., 2012) с линиями вытянутости роз-диаграмм свидетельствует об их соотносительности. Наряду с отчетливо выраженным блоковым строением в пределах Онотского поднятия при компьютерном дешифрировании космоснимка прослеживаются различия во внутреннем строении блоков и межблоковых зон. Так, южное окончание Иркутского амфитеатра, характеризуется центробежным рисунком структурных линий, а территория к СВ от этого блока отличается наличием структурных линий ЮЗ–СВ направления, что, вероятно, связано со сменой простираения границы Сибирской плат-

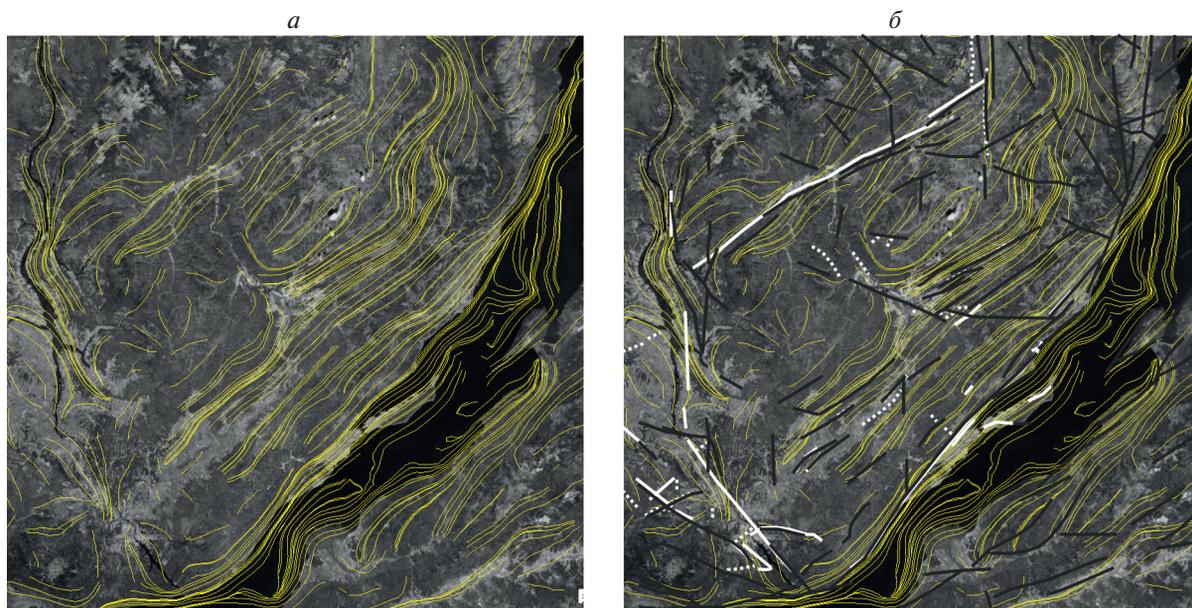


Рис. 6. Линии вытянутости роз-диаграмм (а), построенные на основе формализованного линеamentного анализа (Иванченко, Горбунова, 2021), и синтетическая схема иерархии зонно-блоковой структуры юго-запада Прибайкалья с учетом линеamentов, выделенных в работах (Семинский и др., 2012, черные линии; Лунина, 2016, белые линии – достоверные разломы, активные в плиоцен-четвертичное время, точечный пунктир – предполагаемые) (б).

формы с СЗ (саянское) – Главный Саянский разлом на СВ (байкальское) – Приморский разлом и соответствующего воздействия со стороны подвижного пояса. При этом, на стыке саянского и байкальского направлений формируется субмеридиональная структура, выраженная соответствующей системой линеamentов (рис. 3) и ориентировкой линий вытянутости роз-диаграмм (рис. 6). Ширина сгущений структурных линий в целом сопоставима с мощностью межблоковых зон, установленной по результатам наземных геолого-геофизических исследований (Семинский и др., 2012). Однако для более точного определения этого параметра дизъюнктивов необходимо проводить анализ с использованием более детальных исходных материалов – космоснимков, ЦМР и топографических карт крупного масштаба.

Локальный уровень

В качестве примера информативности обработки космоснимков с использованием программного пакета LESSA для анализа геодинамической обстановки на локальном уровне выбран участок в районе Бугульдейского разломного узла, где в непосредственной близости расположены такие разломы как Приморский, Ольхонский, Прихребтовый, Бугульдейский, Куртунский (Черемных и др., 2018), и участок вдоль зоны Приморского разлома.

Первый участок приурочен к Бугульдейскому дизъюнктивному узлу (рис. 7, а). В его пределах

прослежены протяженные линеamentы СВ простирания, соответствующие Байкальскому направлению, которое является приоритетным и отчетливо выражено на сводной розе-диаграмме (рис. 7, б вверху справа). Остальные направления протяженных линеamentов – субмеридиональное, субширотное и северо-западное имеют подчиненное значение и являются равноценными. Несмотря на некоторые отличия картины линеamentов, полученной при визуальном и компьютерном дешифрировании, результаты в целом подобны. Так, серия прослеженных протяженных линеamentов соответствует сетке известных разломов. Особенно показательна роза-диаграмма малых линеamentов участка (рис. 7, б внизу слева), которая хорошо совпадает с парагенезом сбросовой зоны, характерным для Обручевской системы разломов (Черемных и др., 2018).

Одновременно с этим выделяется ряд сквозных протяженных линеamentов, например, субширотный, субмеридиональный и по направлению СЗ–ЮВ (рис. 7, б), которые лишь фрагментарно прослежены на схеме разломов (рис. 7, а). Дополнительно по данным формализованного анализа в пределах седловины водораздела между реками Бугульдейка и Анга отмечен дизъюнктивный узел, который представлен взаимопересекающимися линеamentами трех направлений и соответствует участку древней палеодолины Пра-Манзурки (Мац и др., 2001).

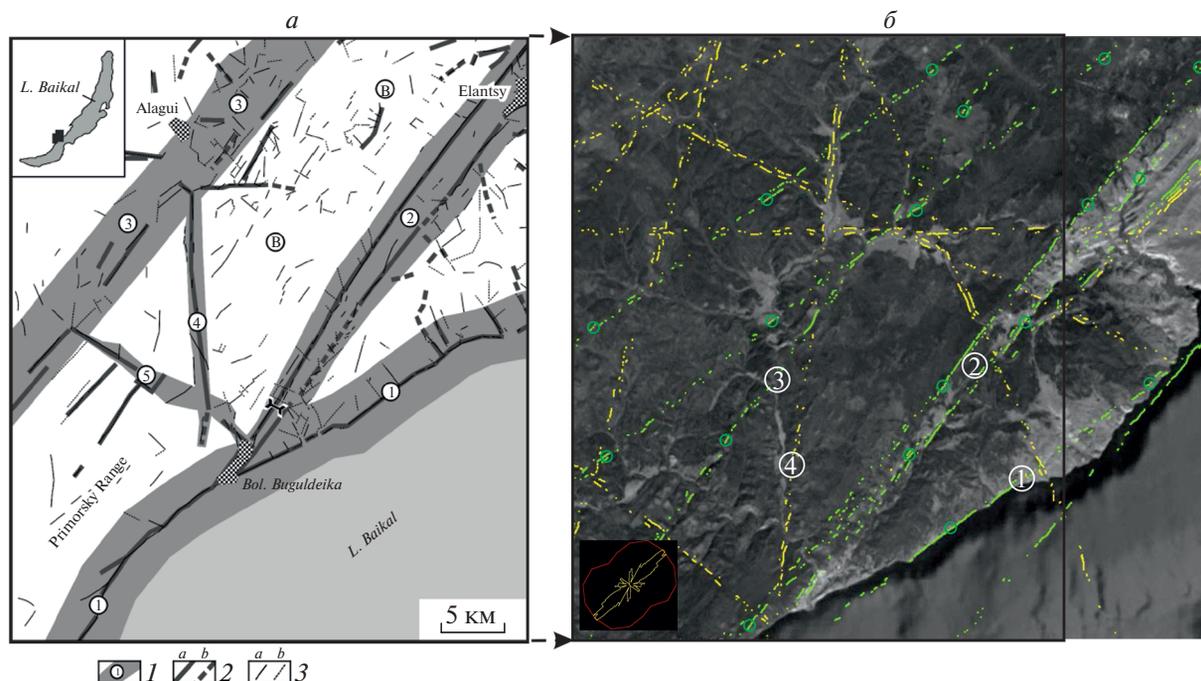


Рис. 7. Схема разломов в районе Бугульдейского дизъюнктивного узла (а) (Черемных и др., 2018) и схема формализованного дешифрирования (б) с порогом выраженности линейментов >150 (светлые линии), в том числе >170 (светлые линии с кружками) (б). 1 – разломные зоны (цифры в кружках): 1 – Ольхонская (Морская), 2 – Приморская (Бугульдейско-Чернорудский грабен), 3 – Прихребтовая, 4 – Бугульдейская, 5 – Куртунская; 2 – линейменты, закартированные на основе анализа топографических карт масштаба 1 : 100000 (а – хорошо выраженные в рельефе, б – слабо проявленные); 3 – линейменты, закартированные при анализе топооснов масштаба 1 : 25000 (а – хорошо выраженные, б – слабо проявленные).

Крупные разломные зоны характеризуются зоной динамического влияния (Шерман и др., 1983), ширина которой может быть установлена путем анализа распределения плотности малых линейментов. На первом локальном участке такое исследование проведено на основе анализа плотности линейментов, хорошо выраженных на топоосновах масштаба 1 : 25000 (рис. 8). На схеме отчетливо прослеживаются Приморская и Ольхонская крупные разломные зоны, а также зона менее протяженного Бугульдейского разлома. Они выделяются цепочечными расположениями максимумов плотности линейментов в пределах зон динамического влияния разломов. Контуры разломных зон на карте (см. рис. 8) проведены по границам локальных разрывов-линейментов, параллельных и причленяющихся к магистральному сместителю разлома (Приморский, Ольхонский и Бугульдейский дизъюнктивы), либо образующих скопления различно ориентированных дислокаций (Прихребтовый и Куртунский разломы) (Черемных и др., 2018). Полученные таким образом контуры Приморской и Прихребтовой разломных зон корреспондируют с шириной межблоковых зон, полученной путем комплексного анализа геолого-геофизической информа-

ции вдоль профиля пос. Баяндай – мыс. Крестовский (Семинский и др., 2012).

В пределах второго участка, приуроченного к южной окраине Малого моря (рис. 9), было проведено исследование внутренней структуры Приморского разлома и прилегающей территории. Разлом отчетливо проявляется в виде уступа рельефа вдоль юго-восточного склона Приморского хребта, который в кайнозойский период развивался как сдвигоброс с преобладанием вертикальной компоненты смещения, азимут падения сместителя ~145°, угол ~70° (Денисенко, Лунина, 2020).

Характер рисунка линейментов в пределах участка сильно отличается. Так, в СЗ части участка сеть линейментов характеризуется наличием структур разного простирания, а в его ЮВ части наблюдается значительное преобладание разрывов СВ простирания (рис. 9, а). В целом, на розе-диаграмме простирания малых линейментов преобладает ЮЗ-СВ направление (на рис. 9, а вверху справа).

В соответствии со схемой плотности малых линейментов СВ направления Приморский разлом по простиранию характеризуется четковидным строением, определяемым чередованием различ-

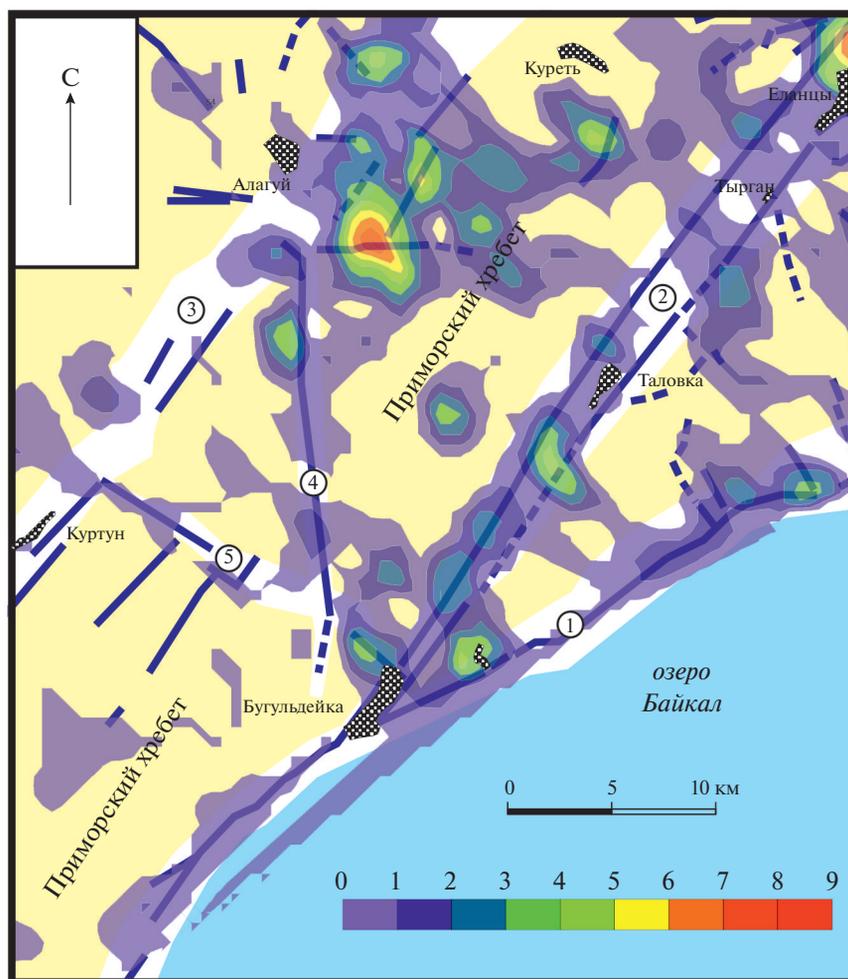


Рис. 8. Сопоставление плотности малых линеаментов с разломными зонами Бугульдейского узла. Цифры в кружках соответствуют разломным зонам на рис. 7.

ной плотности линеаментов (рис. 9, б). Такое строение, вероятно, свидетельствует о присутствии сдвиговой компоненты в новейшей кинематике разлома.

Отмеченный ранее решетчатый рисунок линеаментов, характерный для Сибирской платформы, отчетливо проявляется на СЗ исследуемой территории в поле плотности малых линеаментов. Одновременное исследование протяженных линеаментов со схемой плотности малых линейных элементов позволяет оконтурить Приморскую разломную зону, а также выделить в пределах этой зоны, охватывающей весь Бугульдейско-Чернорудский грабен (рис. 7, а), две подзоны, соответствующие Приморскому и Тырганскому разломам (рис. 9, б). Последнее, безусловно, связано с величиной окна, использованного при подсчете плотности линеаментов, что должно учитываться при проведении подобных исследований.

Дополнительно карты плотности позволяют установить специфику строения зон крупных разломов — выявить сегменты разломов, осложненные близко расположенными парагенетически связанными с ними мелкими разрывами. Окончание зоны Тырганского разлома на северо-востоке участка исследований ограничено акваторией залива Мухор озера Байкал.

Таким образом, исследования, проведенные на двух масштабных уровнях, позволили откартировать Сквозной линеамент, подтвердить существование Субмеридиональной зоны линеаментов вдоль западной границы территории исследований, а также изучить некоторые характеристики известных разломных зон Прибайкальской — Предбайкальской, Прихребтовой и Приморской. Проведенный анализ позволяет как собственно картировать линейные элементы рельефа, так и, для вновь выявленных линеаментов и известных разломных зон, получать новые дан-

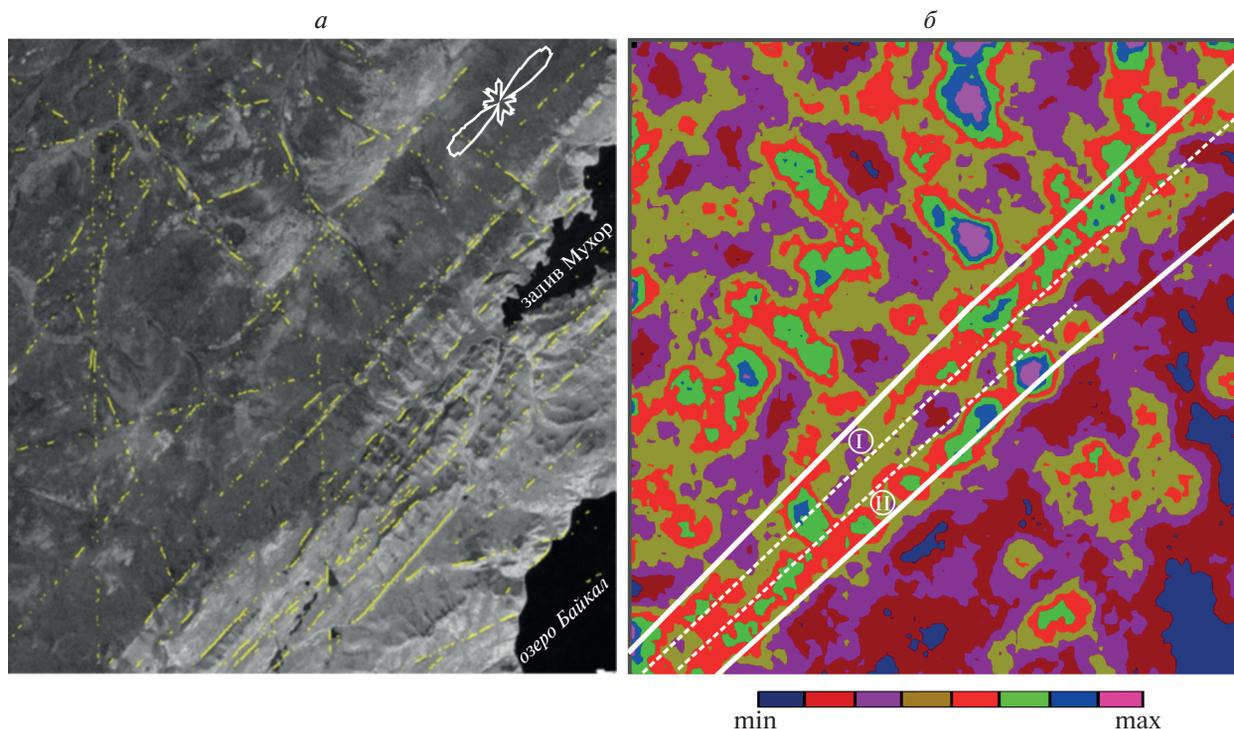


Рис. 9. Схемы формализованного дешифрирования с порогом выраженности линеаментов >150 (а) и пространственного распределения плотностей малых линеаментов СЗ направления (б) (Сплошные белые линии на рис. 9, б – границы разломных зон, пунктирные – границы подзон. Номера в кружках – разломы: I – Приморский, II – Тырганский).

ные о длине, ширине, стадии развития и внутренней структуре.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для исследования особенностей внутреннего строения и морфометрии разломных зон различного иерархического уровня использован линеаментный анализ на основе визуального и компьютерного дешифрирования. Показано, что компьютерное дешифрирование позволяет провести статистический анализ параметров (протяженных линеаментов, полей плотностей и ориентировку преобладающего направления на розах-диаграммах малых линеаментов) и получить результаты сопоставимые с натурными разломами.

Совместная обработка протяженных линеаментов и структурных линий, выделенных с использованием программного пакета LESSA, направлена на изучение природы линеаментов и зонно-блокового строения региона. Применение “фильтрации” линеаментов путем искусственного подавления некоторых направлений (выделение 20 наиболее проявленных линеаментов различных азимутальных направлений) способствует проявлению относительно более ранних линеаментов, часто слабо выраженных в совре-

менном рельефе из-за наложения молодых тектонических нарушений.

Интерпретация основных параметров статистических полей малых линеаментов (секторная и общая плотность, линии вытянутости розы-диаграммы малых линеаментов) позволяет охарактеризовать тектоническую раздробленность земной коры. В ряде случаев, особенно на локальном уровне, можно получать дополнительную информацию о внутренней структуре крупных разломных зон. Некоторые разломы, находящиеся на ранней дизъюнктивной стадии (скрытые разломы по (Макаров, Шукин, 1979; Мац и др., 2001 и др.)), выделяются как линейные зоны повышенной плотности малых линеаментов. Скопления малых линейных элементов рельефа характерно и для хорошо сформированных разломных зон. В связи с чем, представляется весьма перспективной возможность изучения зон разрывных нарушений путем построения карт плотности малых линеаментов.

Апробация подобного научно-методического подхода ранее была проведена авторами для сейсмогенных структур: Тункинской рифтовой впадины ЮЗ фланга Байкальской рифтовой системы и межгорной Чуйской впадины Алтая (Иванченко, Горбунова, 2015). При анализе геодинамиче-

ской обстановки Тункинской впадины установлено, что сочетание протяженных линеаментов и структурных линий характеризует поля тектонических напряжений и особенности строения этой рифтовой впадины. Применение компьютерного дешифрирования в сейсмоактивной зоне Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. М 6.3 позволило понять процесс подготовки основного толчка и исследовать афтершоковый процесс на протяжении последующего ряда лет. Предложенная структурная модель эпицентральной зоны землетрясения (блоково-зональная) была заверена данными компьютерной томографии (Иванченко, 2012; Санина и др., 2005).

Сопоставление зонно-блоковой модели, представленной в работе по результатам визуального дешифрирования (Семинский и др., 2012), с полученными результатами компьютерного дешифрирования свидетельствует об общей хорошей сходимости выделенных структур (рис. 6, б). Положение достоверных разломов, активных в плиоцен-четвертичное время, приведенное в работе (Лунина, 2016), практически полностью совпадает с протяженными линеаментами, определенными нами при пороге выраженности >150 (рис. 3, а, б, в).

Ранее для северо-восточного Прибайкалья, сопредельного с районом исследования, было проведено компьютерное дешифрирование с целью исследования линеаментного рисунка и восстановления полей тектонических напряжений (Балуев, Малкин, 1999). В настоящее время на основе комплексного геолого-геофизического и компьютерного линеаментного анализа выполнено сейсмотектоническое районирование зоны сочленения Евразийской плиты и Амурской субплиты (Трофименко и др., 2016). В 2020 г. для данной территории Златопольским выполнены методические разработки программного пакета LESSA применительно к цифровой модели рельефа (Златопольский, 2020). Результаты этой работы были учтены авторами при интерпретации данных дистанционного зондирования.

Компьютерное дешифрирование позволяет выполнять мелкомасштабное картирование протяженных региональных линеаментов в разных геотектонических областях (Сибирская платформа, Байкальская рифтовая система, Забайкалье). Выделенный Сквозной линеамент СЗ–ЮВ направления (линеаментная зона) (рис. 5), не отмеченный ранее на картах, прослеживается во всех геотектонических областях, что свидетельствует о его возможной неотектонической активности.

При крупномасштабном картировании южная часть Бугульдейской субмеридиональной разломной зоны, выделенная между Прихребтовой и Приморской зонами, детально исследована комплексом геолого-структурных методов (Cherem-

nykh et al., 2020). В то же время использование компьютерного дешифрирования позволило проследить рассматриваемую линеаментную зону севернее Прихребтовой разломной зоны в пределах окраины Сибирской платформы.

На западе исследуемой территории была изучена сложнопостроенная субмеридиональная линеаментная зона (Трансазиатский линеамент 105°) (рис. 3, б), которая ранее на глобальном уровне на геологических картах прослеживалась в виде границы между литосферными блоками. В региональном плане авторами статьи отмечено, что субмеридиональная зона состоит из серии субпараллельных протяженных линеаментов.

Дополнительно выделенные линеаментные зоны на региональном уровне (Сквозной линеамент, северное продолжение Бугульдейского разлома, линеаментная зона 105°), которые частично откартированы на геологических картах, могут соответствовать разломам, преимущественно активным на неотектоническом этапе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формализованное (компьютерное) дешифрирование космоснимков с низким уровнем разрешения (мелкомасштабное картирование), которые находятся в открытом доступе, позволяет анализировать геодинамическую обстановку территории исследований на региональном уровне. Для корректной интерпретации результатов линеаментного анализа на местности выбираются опорные участки (крупномасштабное картирование), в пределах которых могут быть выполнены детальные геологические изыскания, включающие полевое картирование основных систем трещиноватости и разрывных нарушений.

Юго-западная часть Прибайкалья впервые исследуется комплексно на основе полевых работ, визуального и интерактивного компьютерного дешифрирования с использованием программного пакета LESSA. В результате проведенных исследований на мелкомасштабном уровне:

- определены преобладающие (приоритетные) направления протяженных линеаментов на различных этапах эволюции геодинамических условий в кайнозойе на основе анализа соотношения лучей роз-диаграмм при совместной обработке космоснимков и ЦМР;

- дополнительно выделены протяженные линеаментные зоны, протягивающиеся через разные тектонические области с различным режимом геодинамической активности, которые частично откартированы на геологических картах (северная часть Бугульдейской зоны, Сквозная линеаментная зона и зона 105°), которые могут соответствовать разломным зонам, находящимся на разных стадиях формирования.

– определены границы области влияния Байкальской рифтовой системы на тектонический режим периферии Сибирской платформы, выраженные в смене линеamentного рисунка с зонно-блокового (решетчатого) в пределах Сибирской платформы на линейный с преобладающим байкальским направлением (ЮЗ–СВ) серии протяженных линеamentов, отраженной на сводных розах-диаграммах протяженных линеamentов и в полях плотности малых линеamentов.

По данным полевых исследований на ключевых участках и обработки данных дистанционно-зондирования установлены:

– сложное внутреннее строение линеamentных зон, представленное чередованием областей с максимальными и минимальными значениями плотностей малых линеamentов (клавишно-блоковые структуры). В частности, изменчивость полей плотности линеamentов в пределах Приморского и Прихребтового разломов позволяет зонировать эти глубинные структуры и определять их кинематику.

– зоны динамического влияния разломных зон (линеamentных зон) и их ширина на основе анализа всей совокупности структур.

Формализованный линеamentный анализ позволяет определять структурный рисунок региона, исследовать внутреннюю структуру блоков и межблоковых зон, морфокинематику и внутреннее строение глубинных разломов. Разная выраженность глубинных разломов в линеamentных зонах, подтвержденная комплексным анализом на уровне статистических характеристик пространственного и ориентационного распределения малых линеamentов, отражает уровень их геодинамической активности на неотектоническом этапе развития региона. Изучение взаимосвязи новейших и современных разрывных и пластических деформаций участков земной коры способствует реконструкции полей напряжений в различные геологические периоды.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено по темам государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (темы № 122032900172-5 “Развитие методов контроля геодинамических процессов разного иерархического уровня, в том числе инициированных техногенной деятельностью” и № FWEF-2021-0009 “Современная геодинамика, механизмы деформации литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Автоматизированный анализ природных линеamentных систем. Л.: ВСЕГЕИ (Всесоюзный геологический институт). 1988. 131 с.

Анисимова О.В., Короновский Н.В. Линеamentы центральной части Московской синеклизы и их связь с разломами фундамента // Геотектоника. 2007. № 4. С. 71–90.

Аржанникова А.В., Гофман Л.Е. Проявление неотектоники в зоне влияния Приморского разлома // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 6. С. 811–818.

Балуев А.С., Малкин Б.В. Поля тектонических напряжений северо-западной части Байкальской рифтовой зоны по данным компьютерного анализа космических снимков // Исследование Земли из космоса. 1999. № 2. С. 71–78.

Бондур В.Г., Гапонова Е.В. Регистрация из космоса аномальных вариаций линеamentных систем Байкальской рифтовой зоны в период землетрясения с магнитудой $M = 5.6$, состоявшегося 21 сентября 2020 года // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 2. С. 3–14. <https://doi.org/10.31857/S0205961421020020>

Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеamentного анализа космических изображений // Докл. АН. 2005. Т. 402. № 1. С. 98–105.

Гаврилов А.А. Структурные элементы впадины Японского моря и прилегающей континентальной и островной суши по данным космогеологических исследований // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 4. С. 27–40. <https://doi.org/10.31857/S0205961420040041>

Гапонова Е.В., Зверев А.Т., Цидилина М.Н. Выявление аномалий линеamentных систем по космическим изображениям во время сильных землетрясений в Калифорнии с магнитудами 6.4 и 7.1 // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 36–47. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019636-47>

Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В. Геодинамические режимы Центральной Азии западнее и восточнее геораздела $102-104^\circ$ // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 2. С. 334–351. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0478>

Денисенко И.А., Лунина О.В. Позднечетвертичные смещения вдоль Сарминского участка Приморского разлома по данным георадиолокации (Байкальский рифт) // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 3. С. 548–565. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0490>

Драгунов В.И. Транссибирский, Трансазиатский, Кольско-Монголо-Охотский линеamentы и некоторые вопросы минерагии // Общие закономерности геологических явлений. Л.: 1965.

Златопольский А.А. Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) // Соврем. проблемы дист. зондир. Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 102–112.

Златопольский А.А. Получение ориентационных характеристик территории с помощью технологии LESSA. Методика и тестирование на цифровой модели рельефа Предбайкалья // Соврем. проблемы дист. зондир. Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 98–110. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-98-110>

- Иванченко Г.Н.* Интерпретация результатов автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования при оценке современной геодинамической обстановки. М. 2012. 130 с. Диссертация на соискание уч. ст. к. ф.-м. н.
- Иванченко Г.Н.* Картирование протяженных (региональных) линейных элементов по дистанционным материалам // В сб. Структурно-геоморфологические исследования М.: ИФЗ АН СССР. 1991. С. 131–140.
- Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М.* Выраженность рифейских авлакогенов Восточно-Европейской платформы в поле линейных и линейно-элементных форм // Всероссийская конференция с международным участием “Проблемы сейсмоструктоники”. Москва: ИФЗ РАН. 2011. С. 218–223.
- Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М.* Использование данных дистанционного зондирования участков земной коры для анализа геодинамической обстановки. М.: ГЕОС, 2015. 112 с.
- Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М.* Формализованный линейно-элементный анализ геологических структур Прибайкалья // Физика Земли. 2021. № 5. С. 223–234. <https://doi.org/10.31857/S0002333721050082>
- Короновский Н.В., Златопольский А.А., Иванченко Г.Н.* Автоматизированное дешифрирование космических снимков с целью структурного анализа // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 1. С. 111–118.
- Кузьмин С.Б.* Геоморфология зоны Приморского разлома (Западное Прибайкалье) // Геоморфология. 1995. № 4. С. 53–61.
- Куприков Д.Н., Викентьев И.В.* Применение данных космодешифрирования для изучения рудоконтролирующих структур Лебединского рудно-россыпного узла, южная Якутия // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 45–54. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019345-54>
- Леви К.Г., Хромовских В.С., Кочетков В.М., Николаев В.В., Семенов Р.М., Серебрянников С.П., Чипизубов А.В., Демьянович М.Г., Аржанников С.Г., Дельянский Е.А., Смекалин О.П., Ружич В.В., Буддо В.Ю., Масальский О.К., Потапов В.А., Берзинский Ю.А., Радзиминович Я.Б.* Современная геодинамика: сейсмоструктоника, прогноз землетрясений, сейсмический риск (фундаментальные и прикладные аспекты). Статья II // Литосфера Центральной Азии / Ред. Н.А. Логачев. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН. 1996. С. 150–182.
- 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. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215>
- Лунина О.В., Гладков А.С., Черемных А.В.* Разрывная структура и трещиноватость зоны Приморского разлома (Байкальская рифтовая система) // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 5. С. 446–455
- Макаров В.И., Шукин Ю.К.* Оценка активности скрытых разломов // Геотектоника. 1979. № 1. С. 96–107.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакишин 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.
- Миловский Г.А., Беляков А.А.* Применение дистанционного зондирования для выявления особенностей тектонического строения и локализации оруденения в пределах Бирюсинского и Крепско-Туманшетского рудных узлов (восточный Саян) // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 55–65. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019355-65>
- Ранцман Е.Я.* Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука, 1979. 171 с.
- Санина И.А., Усольцева О.А., Иванченко Г.Н., Еманов А.Ф.* Модель глубинного строения зоны Чуйского землетрясения по данным сейсмической томографии и дистанционного зондирования // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер. Труды ИДГ РАН. М., 2005. С. 64–70.
- 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 геолого-геофизических исследований по профилю пос. Баяндай – м. Крестовский // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 2. С. 250–269.
- Семинский К.Ж., Семинский Ж.В.* Спецкартирование разломных зон земной коры и его возможности в исследовании структурного контроля кимберлитов в Алаakit-Мархинском поле Якутской алмазоносной провинции. Иркутск: Изд-во ИРНИИТУ, 2016. 204 с.
- Сим Л.А., Маринин А.В., Брянцева Г.В., Гордеев Н.А.* Результаты изучения тектонических напряжений в регионах Северной Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 771–800. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0371>
- Трофименко С.В., Гильманова Г.З., Никитин В.М., Колодезников И.И.* Линейно-элементный анализ пространственного поля сейсмичности северного сегмента Амурской микроплиты // Наука и образование. 2016. № 1. С. 7–13.
- Хренов П.М.* Скрытые зоны глубинных разломов складчатых областей и платформ (на примере юга Восточной Сибири) // Глубинные разломы юга Восточной Сибири и их металлогеническое значение. М.: Наука. 1971. С. 5–38.
- Черемных А.В., Черемных А.С., Бобров А.А.* Морфо-структурные 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. Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
- Шерман С.И., Днепровский Ю.И.* Поля напряжений земной коры и геологоструктурные методы их изучения. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 158 с.

Agar S.M., Klitgord K.D. Rift flank segmentation, basin initiation and propagation: a neotectonic example from Lake Baikal // *J. Geol. Soc.* 1995. V. 52. P. 849–860.

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 // *J. Geodynamics.* 2020. V. 141–142, 101797.

<https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101797>

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.

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.

Seminsky K.Zh. Internal structure of fault zones: spatial and temporal evolution studies on clay models // *Geodynamics & Tectonophysics.* 2012. V. 3. № 3. P. 183–194. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-3-0070>.

Zlatopolsky A.A. Program LESSA (Lineament extraction and stripe statistical analysis). Automated linear image features analysis - experimental results // *Computers and Geosciences.* 1992. V. 18. № 9. P. 1121–1126.

Some Possibilities of Lineament Analysis for Mapping Different Rated Faults (for Cisbaikalia Example)

G. N. Ivanchenko¹, E. M. Gorbunova¹, and A. V. Cheremnykh²

¹*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Institute of the Earth's Crust Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

The paper presents the results of lineament analysis of the Baikal region via methods of visual interpretation of digital elevation models (DEM) and topographic maps of 1: 100000 and 1: 25000 scales, and formalized (computer) processing of space images and DEM resting on the LESSA software package (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis). A detailed comparison of the results of visual and computer analysis of extended lineaments and statistical fields of small lineaments of digital images of the studied region to the features of the fault-block structure within the Baikal region is carried out. The performed integration of the methods of remote sensing has raised their information capability for the area under investigation concerning mapping faults of different ranks in regions with different tectonic activity. Methods for remote sensing data processing resting on the analysis of lineaments and topographic maps have been proposed. Our methods make it possible to confidently map faults of different ranks of both geodynamically active regions (the Baikal rift system) and relatively stable territories (Siberian platform), as well as to obtain some important parameters of large fault zones at different stages of their evolution, which is supported by field observations in key areas.

Keywords: fault zones, lineaments, computer analyses, Baikal rift, rose diagrams, stages of fault evolution

REFERENCES

Agar S.M., Klitgord K.D. Rift flank segmentation, basin initiation and propagation: a neotectonic example from Lake Baikal // *J. Geol. Soc.* 1995. V. 152. P. 849–860.

Anisimova O.V., Koronovsky N.V. Lineaments in the central part of the Moscow syncline and their relations to faults in the basement // *Geotektonika.* 2007. № 4. P. 71–90. (In Russian)

Arzhannikova A.V., Gofman L.E. Manifestation of neotectonics in the zone of influence of the Primorsky fault // *Russian Geology and Geophysics.* 2000. V. 41(6). P. 785–792. (In Russian)

Automated analysis of natural lineament systems. Leningrad: VSEGEI (All-Union Geological Institute). 1988. 131 p. (In Russian)

Baluev A.S., Malkin B.V. Fields of tectonic stresses in the northwestern part of the Baikal rift zone according to computer analysis of space images // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa.* 1999. № 2. P. 71–78. (In Russian)

Bondur V.G., Gaponova Ye.V. Remotely Registering Anomalous Variations in Lineament Systems of the Baikal Rift Zone during the M = 5.6 Earthquake of September 21, 2020 //

Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. V. 57. № 9. P. 1012–1020.

<https://doi.org/10.1134/S0001433821090437>

Bondur V.G., Zverev A.T. A method of earthquake forecast based on the lineament analysis of satellite images // *Doklady Earth Sciences,* 2005. V. 402. № 4. P. 561–567.

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 // *J. Geodynamics.* 2020. V. 141–142. 101797.

<https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101797>

Cheremnykh A.V., Cheremnykh A.S., and Bobrov A.A. Faults in the Baikal region: morphostructural and structure-genetic features (case study of the Buguldeika fault junction) // *Russian Geology and Geophysics.* 2018. V. 59. P. 1100–1108. (In Russian)

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2018.08.004>

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.

- Denisenko I.A., Lunina O.V.*, 2020. Late Quaternary displacements along the Sarma segment of the Primorsky fault based on GPR survey data (Baikal rift). *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (3). P. 548–565. (In Russian) <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0490>
- Dragunov V.I.* Trans-Siberian, Trans-Asian, Kola-Mongol-Okhotsk lineaments and some questions of minerageny // General laws of geological phenomena. L.: 1965. (In Russian)
- Gaponova E.V., Zverev A.T., Tsidilina M.N.* Detecting lineament system anomalies during strong 6.4 and 7.1 earthquakes in California from satellite imagery // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2019. № 6. P. 36–47. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019636-47>
- Gatinsky Yu.G., Prokhorova T.V., Rundqvist D.V.* Central Asian geodynamic regimes west and east 102–104° geodivider // *Geodynamics and tectonophysics*. 2020. V. 11. № 2. P. 334–351. (In Russian) <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0478>
- Gavrilov A.A.* Structural elements of the Sea of Japan basin and adjacent continental and island dryland according to the space geological data investigations // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2020. № 4. P. 27–40. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0205961420040041>
- Ivanchenko G.N.* Interpretation of the results of automated interpretation of remote sensing data in assessing the current geodynamic situation. M. 2012. 130 p. Art. Ph.D. (In Russian)
- Ivanchenko G.N.* Mapping of extended (regional) lineaments based on remote data // *Structural-geomorphological studies*. M.: IFZ AN SSSR. 1991. P. 131–140. (In Russian)
- Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M.* Application of the remote sensing data of the areas of the earth crust for analysis of the geodynamic situation. M.: GEOS, 2015. 112 p. (In Russian)
- Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M.* Expression of the Rhiphean aulacogens of the East European Platform in the field of lineaments and lineament forms // All-Russian conference with international participation “Problems of seismotectonics”. Moscow: IFZ RAN. 2011. P. 218–223. (In Russian)
- Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M.* Formalized lineament analysis of geological structures in the Baikal region // *Izv., Phys. of the Solid Earth*. 2021. V. 57. № 5. P. 779–788. <https://doi.org/10.1134/S1069351321050086>
- Khrenov P.M.* Hidden zones of deep faults of folded areas and platforms (on the example of the south of Eastern Siberia) // *Deep faults in the south of Eastern Siberia and their metallogenic significance*. M., Nauka, 1971. P. 5–38. (In Russian)
- Koronovskiy N.V., Zlatopolskiy A.A., Ivanchenko G.N.* Automated interpretation of satellite images for the purpose of structural analysis // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 1986. № 1. P. 111–118. (In Russian)
- Kuprikov D.N., Vikentyev I.V.* Application of the data of space decoding for the study of ore-controlling structures of the Lebedinsky ore-placer cluster, Southern Yakutia // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2019. № 3. P. 45–54. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019345-54>
- Kuzmin S.B.* Geomorphology of the Primorsky fault zone (Western Cisbaikalia) // *Geomorphology*. 1995. № 4. P. 53–61. (In Russian)
- Levy K.G., Khromovskikh V.S., Kochetkov V.M., Nikolaev V.V., Semenov R.M., Serebrennikov S.P., Chipizubov A.V., Demyanovich M.G., Arzhannikov S.G., Delyansky E.A., Smekalin O.P., Ruzhich V.V., Buddo V.Yu., Masalsky O.K., Potapov V.A., Berzhinsky Yu.A., Radziminovich Ya.B.* Modern geodynamics: seismotectonics, earthquake forecast, seismic risk (fundamental and applied aspects). Article II // *Lithosphere of Central Asia* / Ed. O.N. Logachev. Novosibirsk: Science. Siberian Publishing Company RAS. 1996. P. 150–182. (In Russian)
- Lunina O.V.* The digital map of the Pliocene-Quaternary crustal faults in the southern East Siberia and the adjacent Northern Mongolia // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2016. V. 7. № 3. P. 407–434. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215>
- Lunina O.V., Gladkov A.S., Cheremnykh A.V.* Fracturing in the Primorsky fault zone (Baikal rift system) // *Russian Geology and Geophysics*. 2002. V. 43(5). P. 446–455. (In Russian)
- Makarov V.I., Shehukin Yu.K.* Assessment of the activity of hidden faults // *Geotectonika*. 1979. № 1. P. 96–107. (In Russian)
- 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.
- Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandelbaum M.M., Alakshin A.M., Pospeshev A.V., Shimaraev M.N., Khlystov O.M.* Cenozoic Baikal Rift Basin: Structure and Geological History. Novosibirsk: Publishing house of SB RAS, branch “Geo”, 2001. 252 p. (In Russian)
- Milovsky G.A., Belyakov A.A.* Application of remote sensing for detection of tectonic structures and localization of ore deposits within the Biryusinsky and Krepsko-Tumanshetsky ore clusters (Eastern Sayan) // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2019. № 3. P. 55–65. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019355-65>
- Rantsman E.Ya.* Places of earthquakes and morphostructure of mountainous countries. M.: Nauka, 1979. 171 p. (In Russian)
- Sanina I.A., Usoltseva O.A., Ivanchenko G.N., Yemanov A.F.* Model of the deep structure of the Chuya earthquake zone according to seismic tomography and remote sensing data // *Proceedings of the IDG RAS*. M. 2005. P. 64–70. (In Russian)
- Seminsky K.Zh.* Internal structure of fault zones: spatial and temporal evolution studies on clay models // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012. V. 3. № 3. P. 183–194. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-3-0070>
- Seminskii K.Zh., Kozhevnikov N.O., Cheremnykh A.V., Pospesheva E.V., Bobrov A.A., Olenchenko V.V., Tugarina M.A., Potapov V.V., Burzunova Yu. P.* Interblock zones of the northwestern Baikal rift: results of geological and geophysi-

cal studies along the Bayandai village – cape Krestovskii profile // Russian Geology and Geophysics. 2012. V. 53(2). P. 194–208. (In Russian)

Seminsky K.Zh., Seminsky Zh.V. Special mapping of fault zones of the Earth's crust and its possibilities in the study of the structural control of kimberlites in the Alakit-Markhinsky field of the Yakutsk diamond province. Irkutsk: Publishing house IRNITU, 2016. 204 p. (In Russian)

Sherman S.I., Bormyakov S.A., Buddo V.Yu. Areas of dynamic influence of faults. Novosibirsk: Nauka, 1983. 112 p. (In Russian)

Sherman S.I., Dneprovsky Yu.I. Stress fields of the earth's crust and geological structural methods of their study. Novosibirsk: Science. Sib. Department, 1989. 158 p. (In Russian)

Sim L.A., Marinin A.V., Bryantseva G.V., Gordeev N.A. Results of the tectonic stress of the Northern Eurasia regions // Geodynamics and tectonophysics. 2018. V. 9. № 3. P. 771–800. (In Russian)

<https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0371>

Trofimenko S.V., Gilmanova G.Z., Nikitin V.M., Kolo-deznikov I.I. Lineament Analysis of Seismicity Spatial Field of the Northern Segment of the Amur Microplate // Science and education. 2016. № 1. P. 7–13. (In Russian)

Zlatopolsky A.A. Program LESSA (Lineament extraction and stripe statistical analysis). Automated linear image features analysis - experimental results // Computers and Geosciences. 1992. V. 18. № 9. P. 1121–1126.

Zlatopolsky A.A. Technique for measuring the orientation characteristics of remote sensing data (LESSA technology) // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2008. V 5. № 1. P. 102–112. (In Russian)

Zlatopolsky A.A. Using LESSA technology to obtain territory orientation characteristics. Methodology and testing with digital elevation model for the pre-Baikal region // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2020. V. 17. № 4. P. 98–110. (In Russian)

<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-98-110>