

ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ЛИНЕАМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПРИБАЙКАЛЬЯ

© 2021 г. Г. Н. Иванченко¹, Э. М. Горбунова¹, *

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: emgorbunova@bk.ru

Поступила в редакцию 14.03.2021 г.

После доработки 30.03.2021 г.

Принята к публикации 01.04.2021 г.

Статья посвящена выделению и исследованию активных неотектонических структур с помощью формализованного (компьютерного) анализа линейных элементов (линеаментов) в южной части сочленения Сибирской платформы и Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Изменяющиеся во времени смещения Амурской субплиты, развитие мантийного диапира и отдаленное влияние Индо-Евразийской коллизии совместно определяют структурообразование и неотектоническую активность исследуемой территории. Особенности геодинамики региона находят отражение в поле малых и протяженных линеаментов. Этот вопрос рассматривается на региональном и локальном масштабных уровнях. Обсуждены некоторые детали метода и интерпретации результатов. Показана статистическая связь параметров формального выделения линеаментов на космоснимках с кинематикой и возрастом активизации соответствующих им кайнозойских дизъюнктивов. Применение линеаментного анализа (технология LESSA) позволило оценить влияние тектонических напряжений БРЗ на плиоцен-четвертичные движения юга Сибирской платформы и формирование морфоструктур в этом регионе. Обсуждаются этапы эволюции напряженного состояния, активности разломов, развития рельефа и некоторые геодинамические модели развития Прибайкальского региона.

Ключевые слова: морфоструктуры, формальный линеаментный анализ, малые и протяженные линеаменты, угловая статистика, геодинамика Прибайкалья.

DOI: 10.31857/S0002333721050082

ВВЕДЕНИЕ

В геолого-структурном плане Байкальский рифт приурочен к дивергентной границе Сибирской и Амурской субплит, предопределенной глубинными неоднородностями литосферы. На условия формирования и эволюцию Байкальского рифта существуют разные точки зрения. Наряду с моделями пассивного и активного рифтогенеза существует синтетическая модель, разработанная для БРЗ школой академика Н. Логачева [Логачев, 2003; Рассказов и др., 2010]. В этой модели учитывается сочетание пассивного и активного рифтогенеза, определяющего историю геологического развития Байкальского рифта. Характер изменений действовавших напряжений обуславливал тип деформации и особенности строения Байкальской впадины и сопредельных с ней морфоструктур, однако, насколько далеко распространялось это влияние в сторону Сибирской платформы на разных фазах остается неясным. В плиоцен-четвертичное время к основным процессам, контролирующим геодинамический режим региона, относится движение Амурской суб-

плиты в юго-восточном направлении со скоростью ~2 мм/год относительно Сибирской платформы [Зоненшайн, 1979; Ашурков 2011; Petit, Fournier 2005], растекание мантийного астеносферного диапира и влияние Индо-Евразийской коллизии [Логачев, 1999; Рассказов и др., 2010; Буслов, 2012; Ружич и др., 2016]. Эндогенные режимы различного генезиса формируют морфоструктурный план региона, поля напряжений и активность систем разрывных нарушений на всех этапах развития БРЗ и прилегающих территорий. Определение различий структурных следов этих режимов в южной части Прибайкалья — одна из возможных задач линеаментного анализа.

Структурно-геологические особенности юго-западного фланга БРЗ и прилегающих участков Сибирской платформы прослеживаются в поле линеаментов, которые традиционно выделяются визуально на цифровых моделях рельефа и космоснимках. Под линеаментами понимаются линейные элементы изображения, отражающие неоднородности природной среды. Геологическим прототипом многих линеаментов являются пре-

имуущественно активные на неотектоническом этапе разрывы, флексуно-разрывные зоны и зоны повышенной трещиноватости, обычно выраженные в рельефе [Макаров, 1981; Макаров, Сенин, 1983].

Формализованный (компьютерный) линеаментный анализ получил широкое развитие с момента появления космических изображений земной поверхности. В конце 1970-х—начале 1980-х гг., вместе с развитием компьютеров появились первые программы компьютерного распознавания линеаментов [Brug, Rosenfeld, 1978; Автоматизированный..., 1988]. Программа интерактивного автоматизированного выделения линеаментов и статистического анализа полей малых линеаментов (LESSA) получила широкое распространение и внедрена в производственную практику геологических исследований с 1983 г. [Zlatopolsky, 1997], и ее коммерческие модификации часто используются для экспресс-оценки структурного плана территории наряду с другими методами. Впервые программный пакет LESSA был применен для анализа разломных зон центрального сектора Северного Кавказа [Короновский и др., 1986]. Программный пакет LESSA непрерывно модифицируется, что можно видеть на специализированном сайте <http://www.lineament.ru/>, где изложены технические подробности, инструкции пользователям и результаты тестирования.

С конца 80-х гг. программа LESSA использовалась при решении сейсмоструктурных задач в различных геодинамических обстановках [Бондур, Зверев, 2005; Иванченко и др., 2009; Иванченко, Горбунова, 2015; Малинников и др., 2011], при разведке и поиске алмазоносных и нефтеносных структур [Серокуров, Калмыков, 1996] и для других целей. Компьютерное выделение и анализ линеаментов показали достаточно высокую достоверность, объективность и практическую значимость формализованного дешифрирования космоснимков при решении геолого-структурных задач в различных ландшафтных условиях. С начала 90-х гг. алгоритмы LESSA включены в геоинформационную систему ERDAS Image. Длительное использование пакета LESSA позволило отработать методику подбора интерактивных параметров обработки изображений для разных регионов и целей [Иванченко, Горбунова, 2015].

Применение программного пакета LESSA позволяет выделять протяженные линеаменты различной длины, направлений и степени выраженности, исследовать их внутреннюю структуру, анализировать статистические характеристики полей малых линеаментов (розы-диаграммы, поля плотности по различным направлениям, линии вытянутости роз-диаграмм). В отличие от работы [Балуев, Малкин, 1999], выполненной для северо-западной части БРЗ по восстановлению

полей тектонических напряжений с использованием программного пакета LESSA, появилась новая возможность создавать сборные линеаментные схемы с разным порогом выраженности. В данной работе с использованием LESSA исследуется проблема генераций структурных рисунков и их отражение в линеаментных областях сочленения Сибирской платформы и БРЗ. Выбранный регион характеризуется незначительным количеством техногенных линейных объектов в ландшафте и умеренно расчлененным рельефом с развитой гидросетью, то есть удобен для выделения тектонически обусловленных линеаментов, их статистики и интерпретации результатов пакета LESSA.

МОРФОТЕКТОНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО РЕГИОНА

Согласно схеме тектонического районирования, составленной по результатам государственной геологической съемки 1 : 100 000, в пределах южного краевого шва Сибирской платформы выделяется Прибайкальский выступ докембрийского фундамента, который сопровождается Прибайкальским перикратонным прогибом (рис. 1а).

Главная Обручевская система разломов шириной до 50 км (рис. 1б) может рассматриваться в качестве границы между Сибирской платформой и БРЗ. С юга-востока к ней примыкает Ольхонский дорифейский террейн. Большая часть территории Сибирской платформы покрыта осадочным палеозой-кайнозойским чехлом, наиболее сохранным в перикратонных прогибах. Предбайкальский прогиб, юго-западная и северная часть Предбайкальского прогиба характеризуются частичной сохранностью мезозойских осадков и кайнозойской седиментацией. Основная часть Предбайкальского прогиба отличается кайнозойской седиментацией и активностью разрывных нарушений.

Известные глубинные разломы контролируют основные морфоструктуры. Предрифтовые структуры ограничены с юго-востока Приморским разломом, входящим в состав Обручевской системы разломов. Ангарский субмеридиональный разлом, выделяемый по сумме косвенных признаков [Государственная..., 2009] (входит в трансрегиональный “линеамент 105 градуса”), представляет активизированную границу между Тунгусским и Маганским архейскими мегаблоками. Жигаловская система разломов [Государственная..., 2009] трассирует цепочку прогибов в рельефе фундамента. Основные вышеперечисленные разломы выражены в современном рельефе.

Зонно-блоковое строение территории изучалось ранее на основе распределения спрямлен-

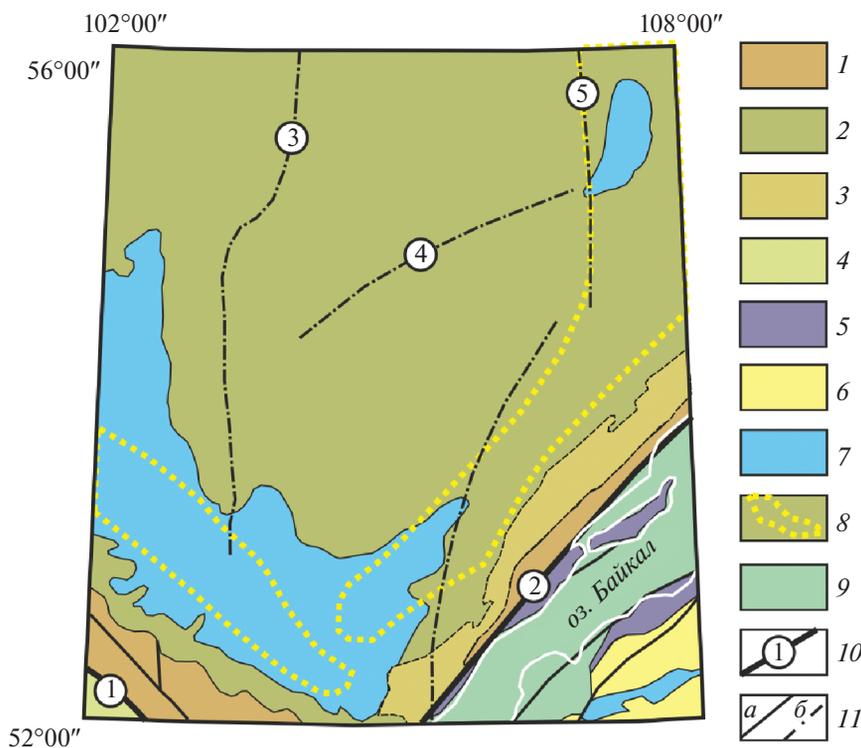


Рис. 1. Тектоническая схема региона (лист N-48) [Государственная..., 2009]: 1 – выступы докембрийского фундамента; 2 – чехол платформы; 3 – рифейские прогибы; 4 – Алтае-Саянская складчатая область; 5 – дорифейские структуры; 6 – структуры Забайкалья; 7 – мезозойские впадины; 8 – новейшие структуры предрифтовой зоны; 9 – БРЗ; 10 – краевой шов платформы, 11 – разломы фундамента: а – с выходом на поверхность, б – перекрытые осадочным чехлом; (1) Главный Саянский, (2) Приморский, (3) Ангарский, (4) Жигаловский, (5) Хандинский.

ных элементов рельефа, выделенных на трехмерной модели геолого-структурными методами с привлечением визуального дешифрирования [Семинский и др., 2012]. Межблоковые зоны северо-западного плеча Байкальского рифта подробно были исследованы на основе геолого-геофизических работ, выполненных по профилю протяженностью 85 км. Межблоковые зоны представляют собой системы разноориентированных и непротяженных линеаментов, которые группируются вдоль основных, установленных разломов, определяющих блоковое строение Сибирской платформы.

На карте [Лунина, 2016] к активным в плиоцен-четвертичное время разломам отнесены Обручевский сброс, ЮЗ–СВ Жигаловская зона разломов по долинам рек Тыпта–Тутура, субмеридиональные Ангарский и Хандинский разломы, северо-западный Иркутский разлом вдоль верхнего течения Ангары. Прерывистая система непротяженных разломов ЮЗ–СВ простирается транзитом Предбайкальскую впадину и ее краевую зону, граничащую с Онотским поднятием. В зоне Приморского разлома выполнено детальное исследование трещиноватости с восстановле-

нием локального и регионального полей напряжений [Лунина и др., 2002].

В пределах рассматриваемого региона линеаментный анализ выполнялся рядом авторов [Delvaux et al., 1997; Лунина и др., 2010; Семинский, Черемных, 2011; Семинский и др., 2018] на основе визуального дешифрирования космоснимков и топокарт различного масштаба и анализа напряженного состояния. Ранее использование автоматизированного линеаментного анализа позволило выделить основные активные глубинные структуры в северной части Прибайкалья [Балуев, Малкин, 1999]. Визуальный линеаментный анализ проведен в пределах Обручевской системы разломов в районе долины р. Бугульдейки с учетом разной выраженности разломов на космических снимках, условий их формирования и подсчетом плотности линеаментов [Черемных и др., 2018]. В результате проведенных исследований подтверждена активизация разломных зон без деформирования блоковых структур на стадии регионального растяжения в южной части Прибайкалья.

На мелкомасштабной схеме зонно-блокового строения Прибайкалья и на карте активных разломов [Лунина, 2016] отражены только основные

глубинные разломы, выделенные структурно-геологическими методами. Внутреннее строение рассматриваемых зон изучено достаточно схематично. Тем не менее, строение Обручевской зоны разломов исследовано достаточно детально [Леви и др., 1995; Семинский и др., 2012], включая Бугульдейский дизъюнктивный узел [Cheremnykh et al., 2018]. Такие участки можно использовать как ключевые при интерпретации результатов компьютерного дешифрирования.

МЕТОДИКА РАБОТЫ

Для анализа геодинамики сочленения Сибирской платформы и северо-западной части Байкальского рифта использованы некоторые возможности компьютерного дешифрирования линеаментов (программный пакет LESSA, автор А. Златопольский, Свидетельство о государственной регистрации программ № 2018616466), трудоемкие или недоступные при визуальном дешифрировании. Обработка космоснимков Landsat с генерализованным разрешением ~100 м проводилась для выделения протяженных линеаментов, построения плотностей малых линеаментов по разным направлениям и в целом. Также выделялись линии вытянутости роз-диаграмм малых линеаментов в скользящем окне. Выделение на изображении протяженных линеаментов с последующим построением их диаграмм угловой статистики (розы по направлениям) основано на введении двух интерактивных параметров: определения длины, после которой линеамент считается протяженным, и определения “порога выраженности” в изображении. Интерактивность параметров сохраняет повторяемость результатов, но не исключает их субъективность.

Первый параметр обычно выбирается около 0.4 от линейного размера анализируемого изображения, поскольку, если необходимо учитывать более короткие линеаменты, удобнее использовать изображения с более высоким разрешением или с меньшей генерализацией. Выраженность линеамента в изображении задается вторым параметром – “порогом” выраженности, чем он выше, тем более визуально заметные линеаменты выделяются программой LESSA. Порог выраженности показывает плотность (насыщенность) полосы определенной относительной длины малыми линеаментами соответствующего направления. Числовые значения порогов зависят от конкретного изображения и показывают соотношения выраженности, являясь лишь относительным параметром, обеспечивающим повторяемость результатов. Как правило, этот параметр хорошо коррелирует с мнениями геологов-дешифровщиков о визуальной заметности линеамента.

На космических снимках исследуемого района доля техногенных линейных элементов ландшаф-

та относительно невелика и незначительно влияет на выделение и статистику пространственного распределения линеаментов. Поэтому большинство прослеженных линеаментов являются природными и, в основном, связаны с разрывными нарушениями и тектонически предопределенными элементами рельефа. Визуальное дешифрирование и его анализ применялись для этого района и ранее [Lunina et al., 2014; Семинский и др., 2012; 2018]. Наши результаты частично совпадают, что помогает в выборе интерактивных параметров, поэтому остановимся на принципиально новых возможностях и данных, предлагаемых пакетом LESSA.

Это использование при выделении линеаментов различных направлений разных критериев выраженности с объединением полученных результатов в единую розу-диаграмму. Поясним наше понимание геологической интерпретации такой математической операции компьютерного дешифрирования. Мы исходим из предположения, что чем активнее и моложе разрывное нарушение и предопределяемые им ландшафтные формы, тем ярче и “очевиднее” линеамент, и тем на более высоком пороге выраженности он выделяется. Таким образом, линеаменты, полученные на высоком уровне выраженности, отражают преимущественно активные в плейстоцене – голоцене линеаменты.

Большая часть этих линеаментов соответствует реактивированным более древним линейным структурам или их фрагментам. Древние и не активированные в верхнем плейстоцене–голоцене нарушения того же ранга выражены значительно слабее. Поэтому, если мы выделим для каждого направления все линейные структуры на, скажем, 20 верхних порогах выраженности, причем для каждого направления свои, мы получим картину линеаментов и соответствующую розу-диаграмму, для которых выраженность в изображении как бы искусственно (математически) уравнена. Так можно дешифрировать картину нарушений, менее зависящую, по нашему мнению, от возраста их активации, то есть сформированную за более длительное время. Это практически невозможно при визуальном дешифрировании. Однако сам выбор уровня отсечения (10, 20, 30 или другой) по порядку выявления линеаментов остается интерактивным, то есть субъективным и зависит от задач и опыта исследователя.

Другой принципиально новой возможностью, предоставляемой LESSA при дешифрировании и используемой в этой работе, являются линии вытянутости (структурные линии), построенные по средним векторам роз-диаграмм малых линеаментов, определенных в скользящем окне [Златопольский, 2008]. Особенностью LESSA является выделение среднего вектора (приведенная ре-

зультирующая длина [Mardia, 1972]) только для участков, где его направление статистически достоверно. Эта величина наиболее устойчива к изменениям параметров обработки. Это позволяет видеть как области с преимущественным развитием малых линеаментов определенного направления, так и выделять “пустые” области с изометрическим рисунком роз в скользящих окнах. Мы интерпретируем такие области как соответствующие более стабильным блокам и/или нуклеарным геологическим структурам. Это используется для анализа морфоструктур исследуемой территории, в частности, вместе с анализом плотностей для оценки области влияния БРЗ на южную часть Сибирской платформы.

Подробно методика обсуждается на сайте <http://www.lineament.ru/>, одна из версий программы доступна на сайте <http://sci-vega.ru/>, мы использовали коммерческую версию технологии LESSA.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Применяя интерактивный метод компьютерного линеаментного анализа (LESSA), была получена серия схем линеаментов. На рис. 2 представлены схемы протяженных линеаментов для различных порогов выраженности – более высоким (>150) (рис. 2а) и более низким (>120) (рис. 2б) уровнях. Сборная карта линеаментов, соответствующих 20 верхним порогам выраженности, разделенно в каждом направлении показана на рис. 3а. В левом верхнем углу (рис. 2б и рис. 3а) приведены розы-диаграммы линеаментов, соответствующие принятым параметрам выделения.

Протяженные линеаменты, которые выделяются на высоком пороге выраженности (>150), немногочисленны и имеют, в основном, ЮЗ–СВ простирание (рис. 2а). Хорошо выражены линеаменты, которые трассируют зону Обручевского сброса и Приморского краевого разлома вдоль западного борта Байкальской впадины. На юго-западе Приморский краевой разлом представлен в виде одиночного линеаменты, а на северо-востоке строение разлома усложняется, образуя линеаментную зону, состоящую из двух субпараллельных разломов.

На этом высоком пороге выраженности, несмотря на немногочисленность линеаментов, выделяются все разломы, отмеченные в базе данных активных разломов для этой территории [Lunina et al., 2014], включая субмеридиональные Ангарский и Хандинский разломы, северо-западный Иркутский разлом вдоль верхнего течения Ангары и ЮЗ–СВ Жигаловскую систему разломов по долинам рек Тыпта–Тутура (рис. 2б). Линеаментная зона, состоящая из трех линеаментов ЮЗ–СВ простирания, трассирует Предбайкальскую впа-

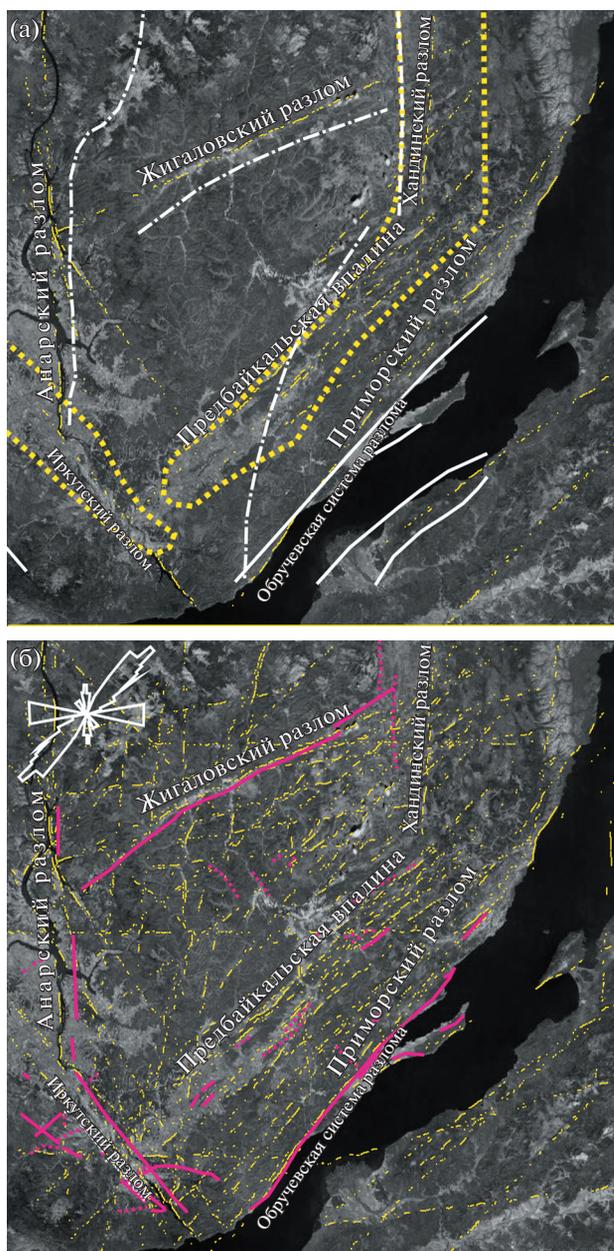


Рис. 2. (а) – Схемы формализованного дешифрирования с порогом выраженности линеаментов >150; (б) (вверху слева) – схемы со сводной розой-диаграммой линеаментов >120; (а) линеаменты – желтые прерывистые линии; с тектонической схемы: разломы – белые сплошные линии, разломы под осадочным чехлом – белые штрих-пунктирные линии; новейшие структуры предрифтовой зоны – контуры желтых точек; (б) – линеаменты – желтые прерывистые линии; разломы с карты активных в плиоцен-четвертичное время разломов [Лунина, 2016]: достоверные – малиновые сплошные линии, предполагаемые – малиновые прерывистые линии).

дину и ее краевую зону, граничащую с Онотским поднятием. Отметим, что в работе [Лунина, 2016] небольшой фрагмент этой зоны определен как активный разлом, а остальные участки отнесены

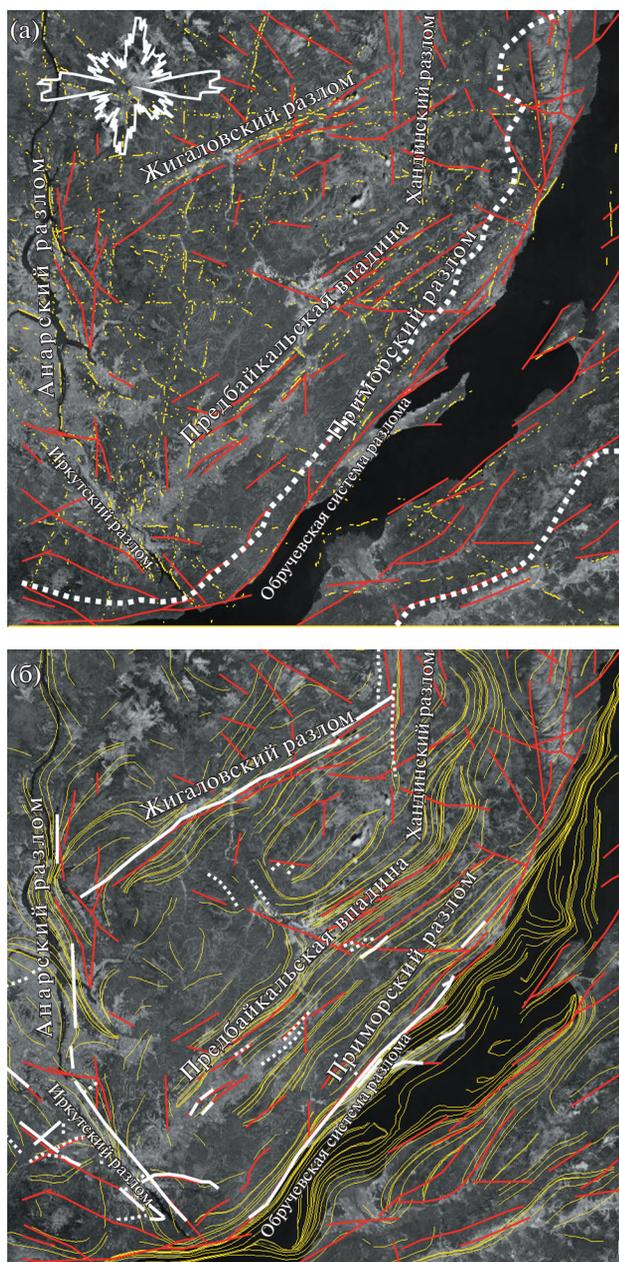


Рис. 3. Схемы формализованного дешифрирования на 20 старших линеаментов по 8 направлениям со сводной розой-диаграммой линеаментов (вверху слева) (а) и линий вытянутости роз-диаграмм (б); (а) — линеаменты — желтые прерывистые линии; разломы — красные сплошные линии; границы Байкальского рифта — область белых точек [Семинский и др., 2012]; (б) — линии вытянутости роз-диаграмм — сплошные желтые линии; разломы — красные сплошные линии [Семинский и др., 2012]; достоверные — белые сплошные линии, предполагаемые — белые пунктирные линии [Лунина, 2016]).

к потенциально активным. Резюмируя анализ линеаментов, выделяемых LESSA на высоком пороге выраженности и выявляющих практически все активные разломы, зарегистрированные тради-

ционными геологическими методами, можно принять предположение, что выраженность линеаментов тесно связана с активностью трассируемых ими разломов. Однако это выполняется в пределах относительно однородных физико-географических (ландшафтных) областей и при ограниченном влиянии антропогенных линейных форм.

Рассмотрим картину линеаментов при более низком пороге выраженности (>120) (рис. 2б). Видно, что общее количество выделенных линеаментов существенно возрастает, появляется достаточно много линеаментов субширотного и субмеридионального направлений и это дает возможность применить статистические методы анализа, такие как построение сводной розы-диаграммы протяженных линеаментов (слева вверху на рис. 2б). Наиболее значительный прирост выделяемых линеаментов отмечается между побережьем Байкала и Предбайкальской впадиной с равнинным и холмисто-увалистым рельефом. Эта активная в неоген-четвертичное время серия разломов ЮЗ—СВ простирания расположена на западном плече Байкальского рифта и, в частности, включает Морской, Приморский, Прихребтовый разломы и субпараллельные этим разломам линеаментные зоны Онотского поднятия и Предбайкальской впадины. Весьма активными выглядят северная часть впадины, а также область концентрации линеаментов, прилегающая к южному окончанию Хандинской впадины. ЮЗ—СВ линеаменты, проходящие вдоль долин рек Тыпта—Тутура (Жигаловский сбросо-сдвиг), отделены от Предбайкальской впадины менее нарушенными блоками. Появляется больше разломов других простираний. К северо-западу от Жигаловской зоны разломов рисунок поля линеаментов меняется на решетчатый. Это указывает на то, что байкальское простирание разломов доминирует вплоть до южной части Лено-Ангарского плато.

Поскольку все эти ЮЗ—СВ линеаменты группируются в широкие зоны и последовательно проявляются по мере снижения порога выраженности, то учитывая те из них, которые имеют оценку кинематики в базе данных активных разломов, эти линеаменты можно отнести к левым сбросо-сдвигам с уменьшением сбросовой составляющей по мере удаления от побережья Байкала. Можно предположить, что северо-западный край этой полосы линеаментов примерно совпадает с границей области влияния БРЗ в верхнем плейстоцене—голоцене.

Сравнение с тектонической схемой листа N-48 (рис. 1) [Государственная..., 2009] показывает, что значительная часть линеаментов и их фрагментов в этой зоне соответствует реактивированным древним дизъюнктивам. Эти нарушения

формировались в геологической истории как сдвиги-взбросы, так что сегодня это скорее обратные взбросы, в то время как настоящие литрические сбросы наблюдаются только в береговой зоне Байкала и из-за дугообразности в плане плохо выделяются программой LESSA. Отметим, что на этом уровне выраженности появляется довольно много субширотных линеаментов, вероятно, соответствующих более древним фазам неотектонической активизации. На геологической карте лист N-48 отмечается несколько субширотных разломов, но говорить об их реактивации нельзя.

Также выделяется группа субмеридиональных линеаментов в широкой полосе, примыкающей с востока к активной Ангарской зоне разломов. Субмеридиональный Бугульдейский разлом прослеживается по р. Бугульдейке, пересекает Онотское поднятие и далее протягивается к северу вплоть до Жигаловской системы разломов. Расположенный восточнее Хандинский субмеридиональный разлом выражен в линеаментах к югу до Предбайкальской впадины.

Соотношение линеаментов разных направлений, выделенных на этом уровне, характеризует их роза-диаграмма (слева сверху на рис. 2б), на которой хорошо видно соотношение северо-восточных линеаментов, преимущественно активных в позднем плейстоцене, и субширотных линеаментов, вероятно, отражающих доверхнеплейстоценовый период неотектонической эволюции региона. Тогда субширотные линеаменты должны соответствовать преимущественно левым сдвигам. Полученная линеаментная картина согласуется с моделями раннего этапа эволюции (раскрытия) Байкальского рифта [Шерман, Леви, 1977; Бала и др., 1990; Малкин, 1983]. Кроме того, регистрируемый переход в районе к северу от устья Ангары субширотного линеамента с западного на восточный берег Байкала с небольшим смещением и изменением направления соответствует такой модели раскрытия Байкала. Такая интерпретация может быть согласована с мнением приведенных выше авторов о роли континентальных “трансформных” субширотных разломов на ранних этапах эволюции (раскрытия) Байкальского рифта

На рис. 3а линеаментов, выделенных по 20 верхним порогам выраженности, раздельным для каждого направления отмечается снижение доли линеаментов СВ простирания, связанных с наиболее активными разломами, при сохранении высокой доли субширотных нарушений и резком увеличении доли субмеридиональных линеаментов. Проявляется серия линеаментов, расположенных в полосе шириной до 100 км к востоку от Ангарского активного разлома. Судя по их выраженности, можно говорить об их важной роли в формировании более ранних, вероятно, плиоце-

новых неотектонических структур Прибайкальского региона. На сводной схеме старших 20 линеаментов выделяется пересекающий Байкал в районе устьев Амги и Бугульдейки парный, сквозной, СЗ линеамент, который отделяет менее нарушенный блок на юге Онотского поднятия от его остальной части. Фрагмент этого линеамента был выделен при полевых наблюдениях [Черемных и др., 2018]

Детализировать особенности блокового строения региона позволяет анализ линий вытянутости роз-диаграмм малых линеаментов (рис. 3б). На этой схеме представлены особенности блокового строения региона. Так, территория между Жигаловской зоной разломов и Онотским поднятием отчетливо разделяется на два блока – более приподнятый и расчлененный северо-восточный блок и относительно стабильный юго-западный блок с менее дифференцированным рельефом и немногочисленными останцами юрских отложений. Этот блок с неупорядоченным рисунком линеаментных форм, возможно, не охвачен реактивной разломов в современную фазу активности БРЗ. Юго-западное окончание Онотского поднятия отличается меньшим количеством активных нарушений северо-восточного простирания, имея облик относительно стабильного блока.

Ярко выраженная в линиях вытянутости роз-диаграмм субмеридиональная Ангарская линеаментная зона отвечает оживлению разломов еще архейского заложения, именуемая [Воронов, 1997] зоной 105 градуса. Эта зона, вероятно, трансрегионального иерархического уровня отражает тектоническую границу Тунгусского и Маганского раннедокембрийских блоков Сибирского кратона и далее проходит почти по биссектрисе южного угла Иркутского амфитеатра в Монголию, где, возможно, предопределяет дискутируемую [Ашурков и др., 2011] западную границу Амурской субплиты, разделяя области влияния альпийских и тихоокеанских геодинамических событий на неотектонические структуры центральной Евразии. Однако для ее изучения используемыми методами необходимы более значительный пространственный охват и генерализация изображения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный линеаментный анализ показал связь дешифровочной выраженности линеаментов с их новейшей активностью, что подтвердилось практически полным совпадением линеаментов, выделенных на высоком пороге выраженности, с картой активных в позднем плейстоцене–голоцене разломов. Рисунок линеаментов на двух порогах выраженности общих для всех направлений, вместе с совпадениями с активными разломами наземного картирования и анализом напряженного состояния коры [Мель-

никова, 2008; Лунина 2016], практически не оставляет сомнений в ведущей роли СЗ–ЮВ растяжения в образовании и реактивации СВ сбросов и сбросо-сдвигов в этом регионе, начиная с тыйской тектонической фазы ~0.1 млн лет назад. Зона, состоящая из серии СВ линеаментов, особенно широко представлена в полосе между побережьем Байкала и Предбайкальской впадиной.

При снижении порога выраженности появляется второй доминирующий (субширотный) луч в розе-диаграмме, который сохраняется и для розы-диаграммы сборного рисунка линеаментов (рис. 3а). Активизация разломов этого направления связана с субширотным или восток–северо-восточным растяжением, существовавшим на более ранней стадии развития БРЗ [Семинский и др., 2018; Мац, 2015]. На этой допозднеплейстоценовой тектонической фазе ныне активные сбросо-сдвиги и сдвиго-сбросы западного побережья Байкала и Онотского поднятия характеризовались преобладанием сдвиговых левосторонних смещений.

Наличие ярко выраженного луча субмеридионального направления на сборной розе-диаграмме линеаментов (рис. 3а) говорит об обилии менее выраженных нарушений и их вероятной активности в прошлом, вероятно, эпизодов сжатия в субмеридиональном или север–северо-восточном направлении. Данные эпизоды сжатия фиксируются в осадках впадин БРЗ [Цеховский и др., 2018; Мац, 2015] и, в частности, могли провоцировать выжимание кембрийской соли в зоне Жигаловского разлома. В течение этих эпизодов субмеридиональные разломы реактивировались и работали как сдвиго-сбросы или даже сдвиго-раздвиги, обретая хорошую выраженность в рельефе и ландшафтах. Однако денудация и режим СЗ–СВ растяжения в последние ~100 тысяч лет привел к снижению выраженности линеаментов субмеридионального направления сравнительно с более активными СВ сдвиго-сбросами и необходимости специальной параметризации формального дешифрирования для оценки участия этих структур в неотектонической истории региона.

К.Ж. Семиным с соавторами [Семинский и др., 2012; 2018] в Западном Прибайкалье изучались разломы структурно-геологическими методами с привлечением морфотектонического анализа рельефа на основе геоморфологических наблюдений и дешифрирования дистанционных материалов. Результаты этого исследования отражает схема (рис. 3б). Она была составлена на основе визуального дешифрирования и анализа распределения спрямленных элементов рельефа (линеаментов) по цифровой модели рельефа.

На схеме формализованного дешифрирования линии вытянутости роз-диаграмм группируются в протяженные зоны, разграничивающие блоки с

меньшей плотностью линеаментов, а главное, с более изометричными розами-диаграммами их углового распределения. Несмотря на то, что линеаменты лишь в определенной степени маркируют активные в новейшее время разломные зоны, полученная схема, в целом, отражает зонно-блоковое строение земной коры региона. Линии вытянутости роз-диаграмм на рис. 3б, с одной стороны, хорошо согласуются с результатами К.Ж. Семина с соавторами, полученными по иной методике и исходным данным, а с другой стороны — позволяют дополнить линеаментный рисунок и детализировать особенности блокового строения региона.

Сравнение угловых статистик линеаментов, полученных при разных параметрах компьютерного дешифрирования, подтверждает существование в истории формирования БРЗ по крайней мере двух геодинамических режимов раскрытия, сменявших друг друга во времени. С первым, более ранним режимом связано образование левосторонних сбросо-сдвигов, хорошо проявленных в линеаментах не самых высоких порогов выраженности одинаковых для всех направлений (рис. 2а). Такой структурный рисунок соответствует механизму сдвига–раздвигу между Сибирской и Амурской субплитами при субширотном растяжении, которое имело место в плиоцене–раннем плейстоцене [Зоненшайн и др., 1979]. Этот режим, возможно, нарушался импульсами субмеридионального или ССВ сжатия под влиянием процессов столкновения Индийской и Азиатской плит (концепция из работы [Molnar, Tarponnier, 1975]). Второй, более поздний, режим соответствует растеканию астеносферного диапира [Логачев, 1999; Gao et al., 2003]. С этим режимом связана обстановка СЗ–ЮВ раздвигу, сопровождавшегося смещениями по нормальным и листрическим сбросам в приосевой части БРЗ и оживлением СВ сдвиго-сбросов предшествующего этапа с усилением сбросовой составляющей. Линеаменты, соответствующие этим нарушениям, остаются выраженными на самых высоких порогах их компьютерного выделения. Такая обстановка характерна для современной эпохи, что подтверждается данными о механизме очагов землетрясений в рассматриваемом регионе [Лунина, 2016].

Формализованный линеаментный анализ позволяет определить зону динамического влияния БРЗ, выраженную структурами растяжения (рис. 4а). Они наблюдаются по краю Сибирской платформы в полосе шириной 70–100 км, характерной чертой которой является пакет вытянутых в северо-восточном направлении параллельно Байкальскому рифту линеаментов (рис. 2).

Внутренняя структура и область динамического влияния основных линеаментных систем про-

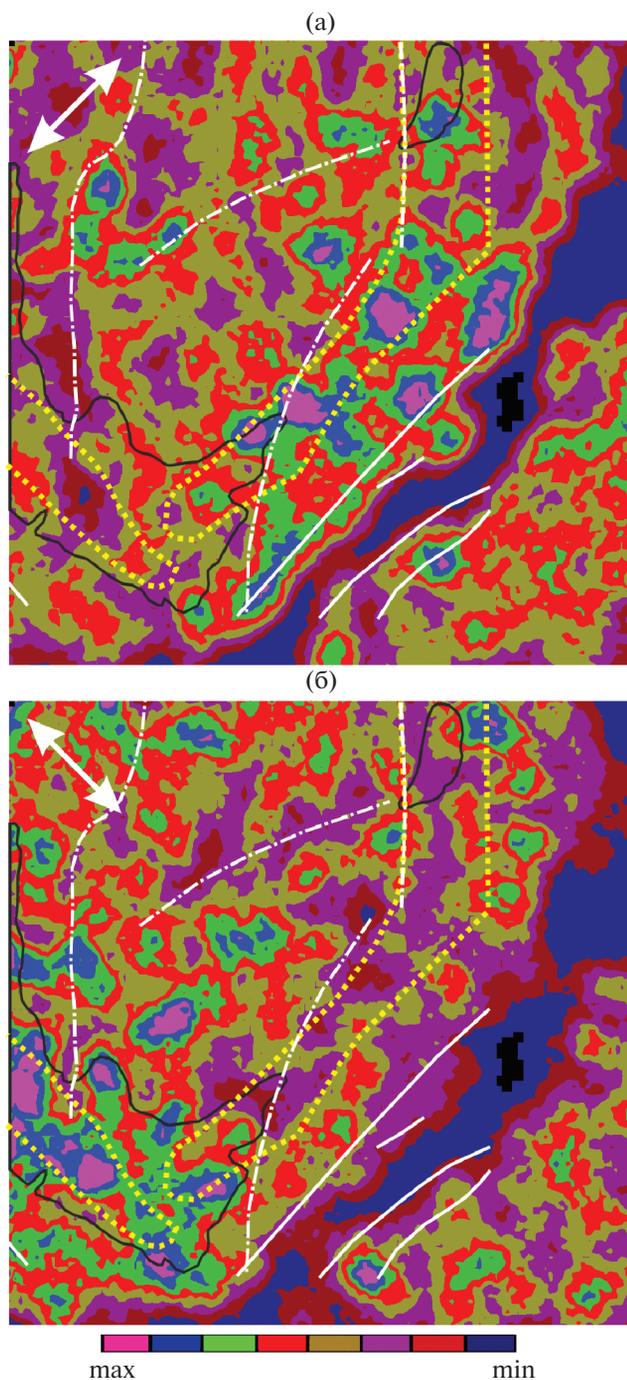


Рис. 4. Схемы плотности линеаментов СВ–ЮЗ (а) и СЗ–ЮВ (б); разломы – белая пунктирная линия, разломы под осадочным чехлом – белая штрих-пунктирная линия; новейшие структуры предрифтовой зоны – область желтых точек; мезозойские впадины – сплошная черная линия [Государственная..., 2009].

является при исследовании линий вытянутости и плотностей малых фотолинеаментов. Плотность малых фотолинеаментов СВ сектора направлений маркирует СЗ плечо Байкальского рифта

(рис. 4а), а аномалии плотности СЗ сектора концентрируются вдоль Иркутской линеаментной зоны (рис. 4б), что, вероятно, обусловлено техногенным шумом. Кроме того, намечается пространственная корреляция повышенной плотности этого направления с распространением юрских осадочных пород.

На схеме плотности СВ–ЮЗ малых линеаментов зона Приморского хребта вдоль Обручевского глубинного разлома разделяется на отдельные блоки-клавиши с чередующимися повышенными и пониженными значениями общей плотности. Юго-восточнее плотности линеаментов маркирует СЗ плечо Байкальского рифта, выраженного морфоструктурами Приморского хребта и Онотского поднятия. Аномалии плотности этого сектора направлений также характерны для дистальных окончаний Жигаловской зоны разломов.

На схемах СВ–ЮЗ и СЗ–ЮВ повышенная плотность соответственно маркирует молодые кайнозойские прогибы – Прибайкальский и Присяянский. Хорошо видно их сложное мозаичное внутреннее строение. Плотность малых линеаментов СВ сектора направлений определяет ширину и особенности строения зоны сочленения Сибирской платформы и БРЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование компьютерного дешифрирования, включающего выделение протяженных линеаментов по разным критериям выраженности, линий вытянутости роз-диаграмм, полей плотности малых линеаментов и построение обобщенных роз-диаграмм, протяженных линеаментов, позволяет выделить активные структуры на неотектоническом этапе развития региона, определить внутреннее строение геоблоков и уточнить их границы. Изучались сочленение и влияние БРЗ на южную часть Сибирской платформы, определена предполагаемая ширина этой зоны и ее морфоструктурные особенности, такие как клавишное строение. Выделены геоблоки, незначительно подвергшиеся влиянию современной фазы активности БРЗ.

В рамках проведенного исследования Байкальский рифт рассматривается с геодинамической и неотектонической точки зрения. Выделены и дополнены некоторые особенности в строении и эволюции Байкальской рифтовой зоны. Подтверждены или усилены некоторые из дискуссионных версий геодинамической эволюции БРЗ, к которым относится формирование разрывных нарушений в ходе активного или пассивного рифтогенеза и влияния прилегающего ансамбля плит и микроплит. В частности, добавочные аргументы получены в пользу существенной роли этапа пассивного рифтинга при

движении в восточном направлении Амурской плиты. Значительная роль протяженных субширотных разломов в развитии структурного плана территории на этапе, предшествующем современному этапу разломообразования, соответствует этой модели. Также подтверждено существование субмеридиональной трансрегиональной структуры.

Компьютерное дешифрирование линейных элементов космического изображения и их структурная интерпретация для юго-западного фланга БРЗ и Прибайкалья проведены с использованием операций, недоступных или крайне трудоемких при визуальном дешифрировании. Это позволило выявить в линеаментных рисунках следы, по крайней мере, двух геодинамических режимов, сменявших друг друга во времени и характеризующихся различным напряженным состоянием и кинематикой активных разломов, что отражается в угловой статистике линеаментов, выделенных автоматически формализованным линеаментным анализом по различным критериям.

Элементы древней структуры реактивируются в плиоцен-четвертичное время в разных геодинамических условиях. Молодые (позднеплейстоцен-четвертичные) сбросы и сбросо-сдвиги часто используют плоскости древних разломов, представляющих собой взбросы и надвиги. Практически только активные или реактивированные разломы участвуют в рельефообразовании и поэтому преимущественно выражены в линеаментах. Соответственно, использование технологии LESSA для геодинамических реконструкций дает новые результаты, но временная глубина исследования ограничена в лучшем случае плиоцен-четвертичным временем.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено по теме государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А19-119021890087-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Ашурков С.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В., Сорокин А.П., Серов М.А., Бызов Л.М. Кинематика Амурской плиты по данным GPS геодезии // Геология и геофизика. 2011. № 2. С. 299–311.

Балла З., Кузьмин М.И., Леви К.Г. Кинематика раскрытия Байкала // Геотектоника. № 2. 1990. С. 80–91.

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

Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений по результатам линеаментного анализа космических изображений // Известия высших учебных заведений: Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. 2005. № 1. С. 76–83.

Буслов М.М. Геодинамическая природа Байкальской рифтовой зоны и ее осадочного выполнения в мел-кайнозойское время: эффект дальнего воздействия Монголо-Охотской и Индо-Евразийской коллизий // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 9. С. 1245–1255.

Воронов П.С. Сдвиги, геофлюктуации и сейсмичность Северной части Восточного полушария Земли. Роль сдвиговой тектоники в структуре литосфер Земли и планет земной группы. СПб.: Наука. 1997. С. 221–230.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист N-48 – Иркутск. Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ. 2009. 574 с.

Златопольский А.А. Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 102–112.

Златопольский А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616466.

Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А., Мишарина Л.А., Солоненко Н.В. Геодинамика Байкальской рифтовой зоны и тектоника плит внутренней Азии. Геолого-геофизические и подводные исследования озера Байкал. М.: Ин-т океанологии АН СССР. 1979. С. 157–202.

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., Соловьев С.П., Локтев Д.Н. Комплексные исследования активности тектонических нарушений в зоне Тункинской рифтовой впадины. Проблемы взаимодействующих геосфер. Труды ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2009. С. 123–130.

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.

Леви К.Г., Бабушкин С.М., Бадардинов А.А., Буддо В.Ю., Ларкин Г.В., Мирошниченко А.И., Саньков В.А., Ружич В.В., Вонг Х.К., Дельво Д., Колман С. Активная тектоника Байкала // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 10. С. 154–163.

Логачев Н.А. Главные структурные черты и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Физическая мезомеханика. 1999. № 1–2. С. 163–170.

Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика, 2003. Т. 44. № 5.

Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н. Тектоническое строение, напряженное состояние, геодинамика мезозойско-кайнозойских рифтовых впадин Прибайкалья // Геотектоника. 2010. № 3. С. 40–67.

- Лунина О.В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 407–434.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Черемных А.В. Разрывная структура и трещиноватость зоны Приморского разлома // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 5. С. 446–455.
- Макаров В.И. Линеаменты (проблемы и направления исследований с помощью аэрокосмических средств и методов) // Исслед. Земли из космоса. 1981. № 4. С. 109–115.
- Макаров В.И., Сенин Б.В. Основные принципы, аспекты и проблемы дешифрирования и интерпретации линеаментов и кольцевых образований // Космическая информация в геологии. М.: Наука. 1983. С. 305–321.
- Малкин Б.В. Геоморфологические признаки пластических разрывов литосферы // Геоморфология. 1983. № 2. С. 74–78.
- Малинников В.А., Учаев Д.В., Учаев Дм.В., Фам Соан Хонан. Разработка алгоритмов и программ линеаментного анализа цифровых изображений земной поверхности // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. № 1. С. 67–73.
- Мац В.Д. Байкальский рифт: плиоцен (миоцен) – четвертичный эпизод или продукт длительного развития с позднего мела под воздействием различных тектонических факторов. Обзор представлений // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 4. С. 467–489.
- Мельникова В.И. Деформационные параметры земной коры Байкальской рифтовой зоны по сейсмологическим данным. Автореферат дис... на соиск. докт. геол.-мин. наук. Иркутск. 2008. 37 с.
- Рассказов С.В., Шерман С.И., Леви К.Г., Ружич В.В., Кожевников В.М., Саньков В.А. Академик Н.А. Логачев и его научная школа: вклад в изучение кайнозойского континентального рифтогенеза // Геодинамика и тектонофизика. 2010. № 1(3). С. 209–224. <https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-3-0017>
- Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Левина Е.А. Оценка геодинамического влияния зон коллизии и субдукции на сейсмостектонический режим байкальского рифта // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 383–406.
- Семинский К.Ж., Саньков В.А., Огибенин В.В., Бурзунова Ю.П., Мирошниченко А.И., Горбунова Е.А., Горлов И.В., Смирнов А.С., Вахромеев А.Г., Буддо И.В. Тектонофизический подход к анализу геолого-геофизических данных на газоконденсатных месторождениях со сложным строением платформенного чехла // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 587–627.
- Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В., Поспеева Е.В., Бобров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Поташов 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., Черемных А.В. Трещинные сети и напряженное состояние кайнозойских осадков Байкальского рифта: новые возможности структурно-парагенетического анализа // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 3. С. 450–469.
- Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д. Кольцевые структуры Земли и алмазоносность // Отечественная геология. 1996. № 11. С. 10–17.
- Цеховский Ю.Г., Балуев А.С., Стукалова И.Е., Корнева Р.Г. Седиментогенез в мезозойских и кайнозойских рифтовых впадинах Центральной Азии. Вып. 617. Труды ГИН. М.: ГЕОС. 2018. 168 с.
- 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., Леви К.Г. Трансформные разломы Байкальской рифтовой системы // Докл. АН СССР. 1977. Т. 233. № 2. С. 461–463.
- Brug van der G.J., Rosenfeld A. Linear feature mapping // IEEE Transactions on Systems, man and Cybernetics. 1978. V. 8. № 10. P. 768–774.
- Cheremnykh A.V., Cheremnykh A.S., 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. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.08.004>
- Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnichenko A., Ruzich 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.
- Gao S.S., Liu K.H., Davis P.M., Slack P.D., Zorin Y.A., Mor-dvinova V.V., Kozhevnikov V.M. Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone // J. Geophys. Res. 2003. V. 108(B4). P. 2194.
- Lunina O.V., Caputo R., Gladkov A.A., Gladkov A.S. Southern East Siberia Pliocene-Quaternary faults: Database, analysis and inference // Geosci. Front. 2014. V. 5. P. 605–619. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.12.006>
- Mardia K.V. Statistics of Directional Data. 1st Edition. Academic Press. 1972. P. 380.
- Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia. Effects of a continental collision // Science. 1975. V. 189. № 4201. P. 419–426.
- Petit C., Fournier M. Present-day velocity and stress fields of the Amurian Plate from thin-shell finite-element modelling // Geophys. J. Int. 2005. V. 160. P. 357–369.
- Zlatopolsky A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Comput. Geosci. 1997. V. 23. № 1. P. 45–62.

Formalized Lineament Analysis of Geological Structures in the Baikal Region

G. N. Ivanchenko^a and E. M. Gorbunova^{a,*}

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

^{*}*e-mail: emgorbunova@bk.ru*

The paper addresses the identification and study of active neotectonic structures based on a formalized (computerized) analysis of linear elements (lineaments) in the southern part of the Siberian Platform's junction with the Baikal Rift Zone (BRZ). The time-varying displacements of the Amurian subplate, the development of the mantle diapir, and the remote effect of the Indo-Eurasian collision jointly determine the formation of structures and the neotectonic activity of the study region. The geodynamic peculiarities of the region are reflected in the system of the small and extended lineaments. This question is considered on the regional and local scale levels. Some details of the method and interpretation of the results are discussed. It is shown that a statistical relationship exists between the parameters of formal identification of lineaments in the satellite images and the kinematics and age of activation of the corresponding Cenozoic faults. Based on the lineament analysis (LESSA technology), the effect of tectonic stresses of BRZ on the Pliocene-Quaternary movements of the southern part of the Siberian Platform and the formation of morphostructures in the region are assessed. The stress-state evolution stages, of fault activation, formation of the relief, and some geodynamic models of the development of the Baikal region are discussed.

Keywords: morphostructures, formal lineament analysis, small and extended lineaments, angular statistics, geodynamics of the Baikal region