

УДК 551.24+550.814

## **АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР СОЧЛЕНЕНИЯ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ МЕТОДАМИ ФОРМАЛИЗОВАННОГО ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА**

*Г.Н. Иванченко, Э.М. Горбунова*

Работа посвящена исследованию линейных структур в юго-западной части Байкальской рифтовой зоны. Особенности геодинамики региона находят отражение в поле линеаментов, которые проанализированы с использованием пакета программ LESSA. Сделаны предположения о статистической связи параметров линеаментов с эволюцией напряжённого состояния Байкальской рифтовой зоны.

### **Введение**

Структурообразование и неотектоническая активность зоны сочленения Сибирской платформы, Амурской субплиты и разделяющей их Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) кайнозойского возраста зависят от изменяющегося во времени смещения Амурской субплиты относительно Евразии. К индикаторам геодинамической обстановки рассматриваемого региона могут быть отнесены линейные структуры, которые выражены в поле малых и протяжённых линеаментов. Геологическим прототипом линеаментов являются преимущественно неотектонические или унаследовано развивающиеся в новейшее время разрывы, флексурно-разрывные зоны и зоны повышенной трещиноватости и проницаемости литосферы, обычно выраженные в рельефе [Макаров, Сенин, 1983]. Это объясняет хорошее совпадение результатов линеаментного анализа изображений и цифровых моделей рельефа того же масштабного уровня.

Исследование линеаментов основано на визуальной и автоматизированной обработке дистанционных материалов – топокарт, космоснимков, цифровых моделей рельефа. Эффективность использования компьютерного анализа применительно к северо-западной части и южному флангу БРЗ в качестве экспресс-метода определения напряженного состояния участков земной коры наглядно продемонстрированы в работах [Балуев, Малкин, 1999; Иванченко и др., 2009; Иванченко, Горбунова, 2015]. Интерактивный метод компьютерного линеаментного анализа (программа LESSA) позволяет выделять линеаменты по различным критериям выраженности и выполнять угловую статистику их распределения.

С учетом предположения о статистической связи параметров выделения линеаментов с возрастом активизации в кайнозойе и их геологической природой можно получить дополнительные аргументы для восстановления геодинамической истории формирования БРЗ. В данной работе эта региональная задача ограничена зоной влияния БРЗ на неотектонику юга Сибирской платформы и формирование морфоструктур в рассматриваемом регионе. Особенности строения области к северо-западу от Байкальской

впадины (северо-западное плечо Байкальского рифта) косвенно свидетельствуют об эволюции напряжённого состояния БРЗ.

### **Методика работы**

Преимущества предложенной методики обработки космоснимков заключается в использовании некоторых возможностей компьютерного дешифрирования линеаментов (программный пакет LESSA), принципиально недоступных при визуальном дешифрировании для анализа геодинамики сочленения Сибирской платформы и юго-западной части Байкальского рифта. Выделение на изображении протяжённых линеаментов с последующим построением диаграмм их угловой статистики (розы по направлениям) основано на введении двух интерактивных параметров: определения длины, после которой линеамент считается протяжённым, и определения «порога выраженности» в изображении. Первый параметр обычно выбирается как 0.4 – 0.5 от линейного размера анализируемого изображения, поскольку, если необходимо учитывать более короткие линеаменты, удобнее использовать изображения более крупного масштаба. Выраженность линеамента в изображении задаётся параметром «порог», для более визуально заметных линеаментов он выше.

На космических снимках исследуемого региона доля техногенных линейных элементов ландшафта невелика и незначительно влияет на выделение и статистику пространственного распределения линеаментов. Поэтому большинство выделенных линеаментов являются природными и, в основном, связаны с разрывными нарушениями и тектонически предопределёнными элементами рельефа. Визуальное дешифрирование и его анализ применялись для этого района и ранее [Семинский и др., 2012; Черемных и др., 2018]. Полученные результаты по ряду линейных структур совпадают, вместе с тем необходимо отметить принципиально новые возможности, предлагаемые пакетом LESSA.

Во-первых, это использование при выделении линеаментов различных направлений разных критериев выраженности с объединением полученных результатов в единую розу-диаграмму. Геологическая интерпретация такой математической операции компьютерного дешифрирования заключается в предположении, что на более высоком пороге выраженности ярче и «очевиднее» выделяется линеамент, соответствующий ландшафтным формам активного и «молодого» разрывного нарушения. Таким образом, линеаменты, полученные на высоком уровне выраженности, отражают активные в плейстоцене - голоцене линейные структуры и могут быть представлены в пределах платформы реактивированными под осадочным чехлом более древними структурами или их фрагментами. Древние и не активированные нарушения выражены значительно слабее.

Поэтому, если выделить для каждого направления все линейные структуры, например, на 20 верхних порогах выраженности, то будет получен рисунок линеаментов и соответствующая роза-диаграмма, для которых выраженность в изображении как бы искусственно (математически) уравнена. Так можно дешифровать картину нарушений, менее зависящую от периода их активации, то есть сформированную за более длительное время. Это практически невозможно при визуальном дешифрировании.

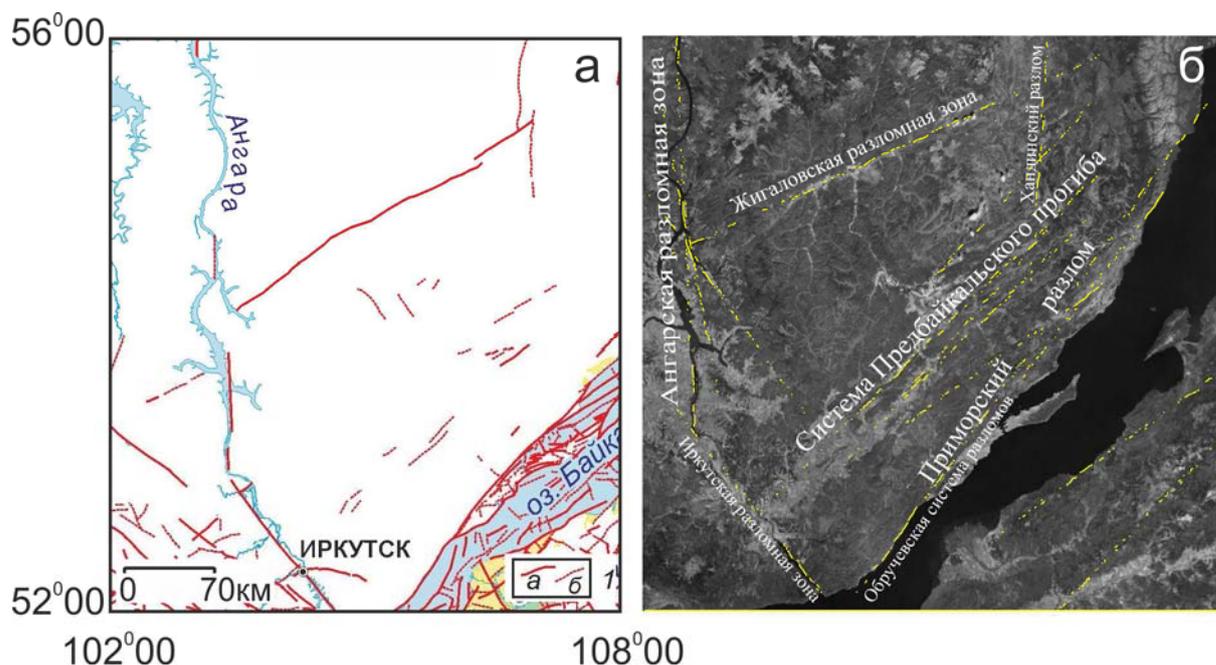
Во-вторых, принципиально новой возможностью, предоставляемой LESSA при дешифрировании и используемой в этой работе, являются «линеаментные формы» или линии тока, построенные по средним векторам роз - диаграммам малых фотолинеаментов, определенных в скользящем окне [Zlatopolsky, 1997]. Особенностью LESSA является выделение среднего вектора (приведённая результирующая длина [Мардиа, 1978]) только для участков, где его направление статистически достоверно. Это позволяет отдельно анализировать области с преимущественным развитием малых фотолинеаментов определённого направления и «пустые» с изометрическим рисунком роз в скользящих окнах. Последние области часто соответствуют стабильным блокам и нуклеарным геологическим структурам. Подобное использование роз-диаграмм малых фотолинеаментов в скользящем окне и производных от них параметров в программном пакете LESSA сокращает трудоёмкость процесса обработки космоснимка и направлено на анализ особенностей морфоструктурного рисунка региона.

### **Полученные результаты**

На основе обработки космоснимка интерактивным методом компьютерного линеаментного анализа (LESSA) была построена серия схем линеаментов. Это схемы протяженных линеаментов на двух общих порогах выраженности - более высоком (<150) (рис. 1б) и более низком (>120) уровнях (рис. 2а), и сборная карта линеаментов, соответствующих 20 верхним порогам выраженности, разделённым для каждого направления (рис. 2б). Числовые значения порогов зависят от конкретного изображения и показывают соотношения выраженности, являясь лишь относительным параметром, обеспечивающим повторяемость результатов.

Протяженные линеаменты, которые выделяются на высоком пороге выраженности (>150) немногочисленны и имеют, в основном, ЮЗ - СВ простирание. Хорошо выражены линеаменты, которые трассируют зону Обручевского сброса и Приморского краевого разлома вдоль западного борта Байкальской впадины. На юго-западе этот дизъюнктив представлен в виде одиночного линеамента. На северо-востоке от побережья Малого моря

строение разлома усложняется, образуя линеamentную зону, состоящую из двух субпараллельных разломов.

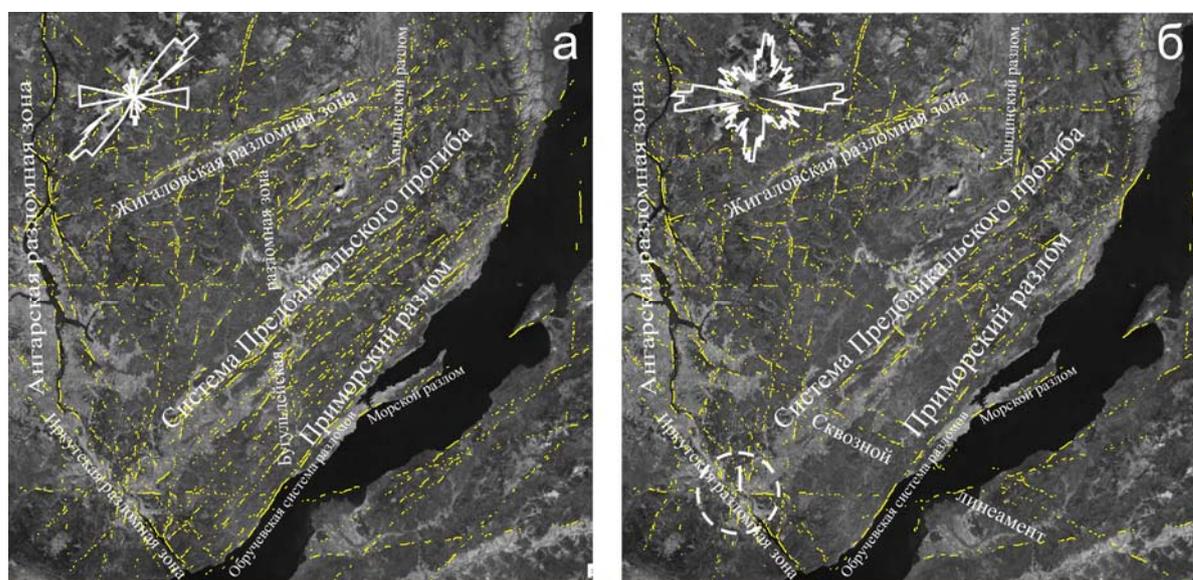


**Рис. 1.** Карта активных в плиоцен-четвертичное время разломов (а) [Лунина, 2015 ] и схема автоматизированного дешифрирования с порогом выраженности линеаментов  $<150$  (б) (1 – разломы: а – достоверные, б – предполагаемые)

На этом уровне, несмотря на немногочисленность линеаментов, выделяются все дизъюнктивы, отмеченные в базе данных активных разломов этой территории (рис. 1а) [Лунина, 2015 ], включая субмеридиональные Ангарский и Хандинский разломы, северо-западный Иркутский разлом вдоль верхнего течения Ангары и ЮЗ-СВ Жигаловскую разломную зону по долинам рек Тыпта-Тутура. Линеamentная зона, состоящая из трех линеаментов ЮЗ - СВ простирания, трассирует Предбайкальскую впадину и её краевую зону, граничащую с Онотским поднятием. Отметим, что в работе [Лунина, 2015 ] небольшой фрагмент этой зоны определён как активный разлом, а остальные участки отнесены к потенциально активным.

Анализ линеаментов, выделенных LESSA на высоком пороге выраженности и выявляющих практически все активные разломы, зарегистрированные традиционными геологическими методами, подтверждает взаимосвязь линеаментов и активность трассируемых ими разломов. Это, разумеется, действительно в пределах относительно однородных физико-географических (ландшафтных) областей и при ограниченном влиянии антропогенных линейных форм. Линеаменты Предбайкальской впадины, выделенные на этом уровне, можно рассматривать, как объекты для изучения возможной современной активности региона в дополнение к существующей карте активных разломов (рис. 1).

На схеме автоматизированного дешифрирования при более низком пороге выраженности (<120) видно, что общее количество выделенных линеаментов существенно возрастает (рис. 2а). Появляется достаточно много линеаментов субширотного и субмеридионального направлений и это позволяет применить статистические методы анализа такие, как построение сводной розы-диаграммы. 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 простирается расположена на западном плече Байкальского рифта и, в частности, включает Морской, Приморский, Прихребтовый разломы и субпараллельную этим разломам линеаментные зоны Онотского поднятия и Предбайкальской впадины.



**Рис. 2.** Схемы автоматизированного дешифрирования с порогом выраженности линеаментов >120 (а) и на 20 верхних порогах выраженности (б) (вверху слева – розы-диаграммы; 1 – Иркутский узел)

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.

Поскольку все эти линеаменты группируются в широкие зоны и последовательно выделяются по мере снижения порога выраженности, то учитывая те из них, которые имеют оценку кинематики в базе данных активных разломов, все эти линеаменты можно отнести к левым сбросо-сдвигам с уменьшением сбросовой составляющей по мере удаления от побережья Байкала. Вероятно, что северо-западный край этой зоны линеаментов пространственно примерно совпадает с границей области растяжения БРЗ в

верхнем плейстоцене-голоцене, то есть в последние ~100 тысяч лет, которые определяют термин «активный разлом».

Сравнение с геологической картой [Государственная., 2009] показывает, что значительная часть линеаментов и их фрагментов в регионе соответствует реактивированным древним дизъюнктивам. Разломы в Западном Прибайкалье исследовались преимущественно структурно-геологическими методами с привлечением морфотектонического анализа рельефа на основе геоморфологических наблюдений и дешифрирования дистанционных материалов [Семинский и др., 2012]. Эти нарушения формировались в геологической истории как сдвиго-взбросы, так что сегодня это скорее обратные взбросы, в то время как настоящие листрические сбросы наблюдаются только в береговой зоне Байкала и из-за дугообразности в плане плохо выделяются программой LESSA.

На этом уровне выраженности появляется довольно много субширотных линеаментов, вероятно соответствующих более древним фазам неотектонической активизации. На геологической карте отмечается несколько субширотных разломов, но судить об их реактивации не представляется возможным [Государственная., 2009].

Также выделяется группа субмеридиональных линеаментов в широкой полосе, примыкающей с востока к активной Ангарской зоне разломов. Субмеридиональный Бугульдейский разлом, выделенный в работе [Черемных и др., 2018] до Прихребтовой разломной зоны, на схеме автоматизированного дешифрирования с порогом выраженности линеаментов  $>120$  прослеживается вверх по реке Бугульдейке, пересекает Онотское поднятие и далее протягивается к северу вплоть до Жигаловской разломной зоны. Хандинский субмеридиональный разлом, выраженный в линеаментах, в северной части совпадает с выделенной ранее разломной зоной [Геологическая., 2009; Семинский и др., 2012]. По данным автоматизированного дешифрирования продолжение Хандинского дизъюнктива в линеаментах установлено к югу до Предбайкальской впадины.

Соотношение линеаментов разных направлений, выделенных на этом уровне, характеризует их роза-диаграмма (рис. 2а), на которой хорошо видно преобладание северо-восточных линеаментов, преимущественно активных в позднем плейстоцене, относительно субширотных линеаментов, вероятно, отражающих доверхнеплейстоценовый период неотектонической эволюции региона.

Такая интерпретация может быть согласована с мнением ряда авторов о роли континентальных «трансформных» субширотных разломов на ранних этапах эволюции (раскрытия) байкальского рифта [Бала и др., 1990; Малкин, 1983]. В этом случае субширотные линеаменты должны соответствовать преимущественно левым сдвигам.

Регистрируемый LESSA переход в районе к северу от истока реки Ангары субширотного линеамента с западного на восточный берег Байкала с небольшим смещением и изменением направления соответствует такой модели раскрытия Байкала. Отметим также, что на этом уровне выраженности появляются линеаментные (дизъюнктивные) узлы - области пересечения нарушений нескольких направлений. К ним относится и Иркутский узел (1), в котором сходятся линеаменты четырех направлений.

На региональном рисунке линеаментов, выделенных по 20 верхним порогам выраженности, отдельным для каждого направления, отмечено своеобразное «уравнивание» шансов попадания линеаментов, проявленных в анализируемом изображении, в сводную розу-диаграмму, независимо от уровня их выраженности (рис. 2б). В этом случае прослежено 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. Выделенные субпараллельные линеаменты, судя по их выраженности, вероятно, соответствуют неотектоническим структурам, сформированным на более раннем плиоценовом этапе развития.

На сводной схеме линеаментов, выделенных по 20 верхним порогам выраженности, выделяется пересекающий Байкал в районе устьев рек Амги и Бугульдейки парный, сквозной, СЗ линеамент, который отделяет менее нарушенный блок на юге Онотского поднятия от его остальной части. Фрагментарно в пределах долины реки Куртун этот линеамент выделен в работе [Семинский и др., 2012].

Методами LESSA была получена схема линеаментных форм, которая позволила детализировать особенности блокового строения региона (рис. 3б). Так территория между Жигаловской разломной зоной и Предбайкальским прогибом отчётливо разделяется на два блока - более приподнятый и расчленённый северо-восточный блок и относительно стабильный юго-западный блок с менее дифференцированным рельефом и немногочисленными останцами юрских отложений.

### **Обсуждение результатов**

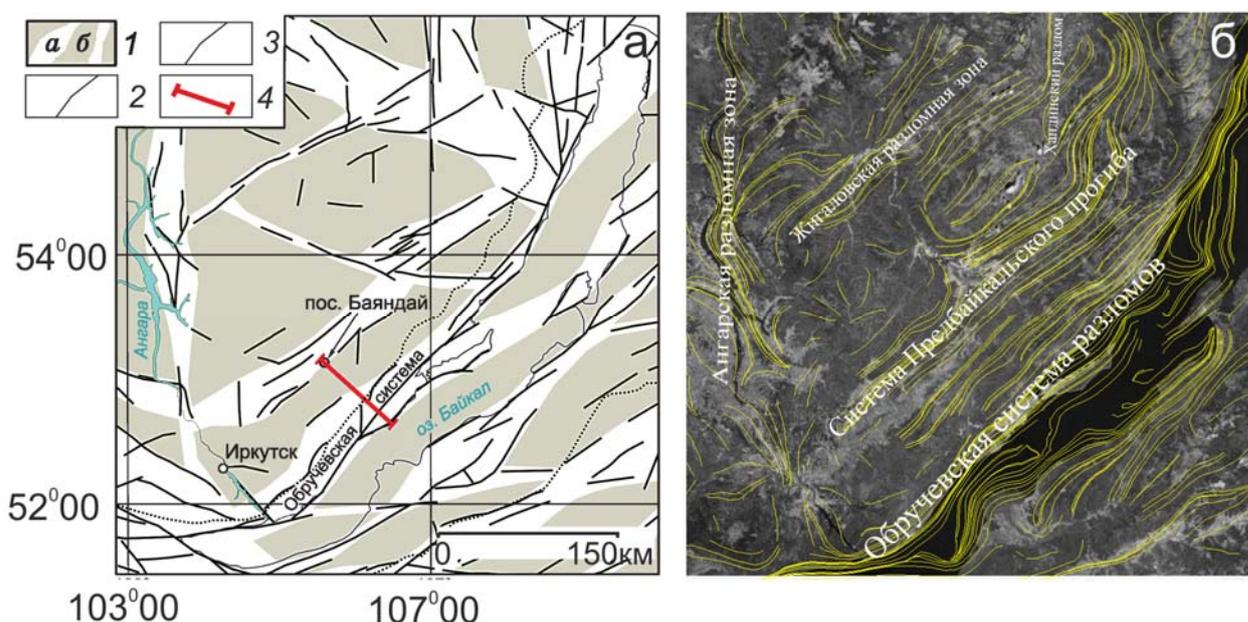
Проведённые исследования показали следующее:

- формальный линеаментный анализ LESSA позволяет выделять линеаменты, их сгущения (линеаментные зоны), а также их системы и совокупности (структурные рисунки), сформированные по какому-либо признаку, причём выделение фиксируется при выборе параметров программы, что обеспечивает полную повторяемость результатов;

- связь дешифровочной выраженности линеаментов с их новейшей активностью подтвердилась практически полным совпадением линеаментов, выделенных на высоком пороге выраженности с картой активных в верхнем плейстоцене – голоцене разломов;

- ведущая роль СЗ – ЮВ растяжения в образовании и реактивации СВ сбросов и сбросо-сдвигов в рассматриваемом регионе, начиная с тьйской тектонической фазы ~0.1 млн. лет назад прослежена на схемах линеаментов, карте активных разломов и отражена в анализе напряжённого состояния коры;

- зона, состоящая из серии СВ линеаментов, особенно широко представлена в рифейском Прибайкальском прогибе и может быть отнесена к активной.



**Рис. 3.** Схемы зонно-блоковой структуры земной коры Прибайкалья (а) [Семинский и др., 2012] и линеаментных форм (б) (1 – участки, занимаемые подвижными зонами (а) и блоками(б); 2 – границы Байкальского рифта; 4 – разломы, выраженные в рельефе уступами и спрямленными элементами речных долин; 5 – профиль )

Возможность создавать сборные линеаментные схемы с разным порогом выраженности представляет новый информативный параметр для структурных интерпретаций в отличие от ранее выполненных работ по сходной методике [Балуев Малкин, 1999]. Так при снижении порога выраженности появляется второй доминирующий (субширотный) луч в розе – диаграмме, который сохраняется и для розы - диаграммы сборного рисунка линеаментов (рис. 2б).

Полученные результаты автоматизированного дешифрирования с использованием программного пакета LESSA, представленные на рисунках 1б, 2 и 3б, с одной стороны хорошо согласуются с схемой зонно-блоковой структуры земной коры Прибайкалья, которая была составлена на основе визуального дешифрирования и анализа распределения спрямленных элементов рельефа (линеаментов) по цифровой модели

рельефа (рис. 3а) [Семинский и др., 2012]; с другой - позволяет детализировать особенности блокового строения региона.

Результаты обработки космоснимка программным пакетом LESSA подтверждают существование в истории формирования БРЗ по крайней мере двух геодинамических режимов раскрытия, сменявших друг друга во времени. С первым режимом связано образование левосторонних сбросо-сдвигов, хорошо проявленных в линеаментах высоких порогов выраженности, одинаковых для всех направлений. Такой структурный рисунок соответствует сдвигу-раздвигу между Сибирской плитой и Амурской субплитой 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. С режимом второго типа (растекание астеносферного диапира связана обстановка СЗ - ЮВ раздвиг, сопровождавшегося смещениями по нормальным и листрическим сбросам в приосевой части БРЗ и оживлением СВ сдвиго-сбросов предшествующего этапа с усилением сбросовой составляющей. Это наиболее ярко выраженные нарушения в линеаментах.

Такая обстановка характерна для современной эпохи и согласуется с данными о механизме очагов землетрясений, регистрируемых в рассматриваемом регионе [Мельникова, 2008]. По результатам формального линеаментного анализа хорошо фиксируется зона динамического влияния БРЗ, выраженная структурами растяжения. Эти структуры прослеживаются по краю Сибирской платформы в полосе шириной 70-100 км в виде серии субпараллельных линеаментов, вытянутых в северо-восточном направлении параллельно Байкальскому рифту.

### **Заключение**

В статье выполнен формальный (программа LESSA) линеаментный анализ космического изображения Прибайкальского региона с преимущественным использованием операций, которые невозможно применить для исследования современного структурного плана БРЗ и Прибайкалья при визуальном дешифрировании. В результате выполненных исследований получены дополнительные данные, подтверждающие некоторые особенности в строении и эволюции Байкальской рифтовой зоны и дополняющие уже известные факты и отдельные из существующих конкурирующих версий развития БРЗ. Элементы древней структуры реактивируются в плиоцен-четвертичное время в разных геодинамических условиях. Молодые (современные) сбросы и сбросо-сдвиги часто используют плоскости древних разломов,

представлявших собой взбросы и надвиги. Практически только активные или реактивированные разломы участвуют в рельефообразовании и выражаются в поле малых и протяженных линеаментов. Соответственно, использование технологии LESSA эффективно для геодинамических реконструкций, но ограничено плиоцен-четвертичным временем для данного региона.

*Работа выполнена по теме Гос. задания № АААА - А17 - 117112350020-9 и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-01271).*

### Литература

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 // Исследование Земли из космоса. 1999. № 2. С. 71–78.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист N-48 – Иркутск. Объяснительная записка. СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ. 2009. 574 с.

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.

Лунина О.В. Разломы плиоцен-четвертичной активизации юга Восточной Сибири и их роль в развитии сейсмически индуцированных геологических процессов. Автореферат дис. на соиск. докт.г.-м.н. М., 2015. 32 с.

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.

Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. М.: Наука. 1978. 240 с.

Мельникова В.И. Деформационные параметры земной коры Байкальской рифтовой зоны по сейсмологическим данным. Автореферат дис. на соиск. докт.г.-м.н. Иркутск. 2008. 37 с.

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.

Черемных А.В., Черемных А.С., Бобров А.А. Морфоструктурные и структурно-парагенетические особенности разломных зон Прибайкалья (на примере Бугульдейского дизъюнктивного узла) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 9. С. 1372–1383.

Zlatopolsky A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Computers & Geosciences. 1997. V. 23. № 1. P. 45-62.