

ЛИНЕАМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ КОСМОСНИМКОВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТУНКИНСКОЙ ВЕТВИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Г.Н. Иванченко

С помощью пакета программ LESSA проведена компьютерная обработка мозаики космических снимков LANDSAT для территории Тункинской впадины. Сравниваются модели напряжённого состояния, определенные по результатам автоматизированного линеamentного анализа, сейсмологическим и структурно-геологическим данным. Установлено преобладание линеamentов субширотного простирания, входящих в сдвиговую зону деструкции, выделенную геологическими и сейсмологическими методами. Линии вытянутости роз–диаграмм малых линеamentов хорошо коррелируют с направлениями траекторий растяжения, полученными при измерениях трещиноватости по методу О.И. Гущенко, и согласуются с направлением векторов тектонических сил по сейсмологическим данным.

Введение

Структурное дешифрирование космических изображений – традиционный метод картирования элементов разрывной тектоники при построении региональных геодинамических моделей. В работе рассматриваются возможности автоматизированного дешифрирования линейных элементов изображения при исследовании напряжённого состояния земной коры, региональных разрывов и особенностей пространственного распределения линеamentов. Эти результаты используются при анализе геодинамической обстановки вместе с геологическими, геофизическими и сейсмологическими данными для выбора геодинамической модели на примере сейсмоактивного района с хорошей изученностью. Дешифрирование выполнялось на основе большой мозаики космических снимков в условиях хорошей дешифрируемости и малой зашумлённости изображений техногенными объектами (Тункинская ветвь Байкальской рифтовой зоны). Это позволяет сопоставлять полученные результаты с независимыми наблюдениями для выбора наиболее адекватной геодинамической модели.

Общая характеристика Тункинской ветви Байкальской рифтовой зоны

Крупнейшая на территории России Байкальская рифтовая зона (БРЗ) протягивается на 2500 км из Северо-Западной Монголии через горные сооружения юга Восточной Сибири до Южной Якутии и разделяется на центральную (Байкальскую) часть, а также юго-западный и северо-восточный фланги. Для БРЗ характерны общие для всех рифтовых впадин черты, которые по Н.А. Флоренсову [Флоренсов, 1960] определяются морфологической выразительностью рифтовых структур (озерные и суходольные межгорные впадины, расположенные одна за другой или кулисообразно), интенсивным неоген-четвертичным вулканизмом (ныне угасшим),

значительными геофизическими аномалиями, включая мантийные, высокой сейсмичностью и другими признаками новейшей тектоники. В региональном плане БРЗ является северо-западной границей Амурской субплиты [Zonenshain, Savostin, 1981] и одновременно входит в восточноазиатское «горячее поле» – область повышенного теплового потока, мантийных аномалий и молодого базальтового вулканизма. Амурская плита определяется по движениям верхней, жесткой части литосферы, а «горячее поле» – по состоянию мантии и тепловому потоку. Отсюда проистекает возможность формирования БРЗ согласно двум основным механизмам рифтинга – пассивному, при расхождении плит или субплит, и активному, при подъеме мантийных диапиров [Шерман и др., 2002]. Эти режимы существенно различаются по напряженному состоянию земной коры и стилю разломообразования. Разумеется, возможна и интерференция этих режимов [Malkin, Shemenda, 1991].

Тункинская ветвь БРЗ по Тункинскому разлому ограничена с севера хребтом Тункинские Гольцы, с юга – Хамар-Дабаном и составлена отдельными котловинами, расположенными широтно и разделенными межвпадинными перемычками. С запада на восток это изолированные локальные впадины: Мондинская, Хойтогольская, Туранская, Тункинская, Торская, Быстринская. Их разделяют соответственно межвпадинные перемычки: Харадабанская, Туранская, Ниловская и Еловская. Кроме того в днище крупнейшей собственно Тункинской впадины имеется выступ фундамента – массив Бадары

Перемычки прорезаны долинами рек Иркут и Ихе-Ухгунь, объединяющими все котловины в одну систему. Как для всех рифтов Байкальской рифтовой системы для Тункинской ветви характерна линейная вытянутость неотектонических структур, все главные элементы которых (рифтовые долины и впадины) выражены в рельефе и в региональном плане приурочены к сводовому поднятию над астеносферным выступом. Наличие аномальных тепловых потоков, гидротермальная деятельность и проявления базальтовидного вулканизма вместе с современной высокой сейсмичностью характеризуют практически всю БРЗ, но в Тункинской ветви проявлены наиболее ярко.

Земная кора на больших участках вдоль оси рифтовой зоны находится сейчас или находилась значительную часть плиоцен-четвертичной эпохи в обстановке растяжения. Сжатие распространено локально и эпизодически. Тункинский рифт обладает всеми этими признаками [Гольдин и др., 2001, Иванченко и др., 2009, Семинский и др., 2009, Уфимцев и др., 2006]. Своеобразие Тункинской ветви придают насыщенность междувпадинными перемычками, а также признаки современной геодинамической активности с большим, чем у других рифтов БРЗ, участием сдвигов и взбросов, что определяет характер современной сейсмичности. Наличие активных взбросов и взбросо-сдвигов отражает более сложное чередование режимов сжатия и растяжения, с большим участием деформаций укорочения, чем в других впадинах БРЗ. Система впадин Тункинской ветви высокосейсмична, отмечена 9 балльная сейсмичность по инструментальным наблюдениям и 10 балльная – по палеосейсмодислокациям.

Анализ напряженного состояния южного фланга Байкальской рифтовой зоны

Деформационный режим на позднечетвертичном этапе развития Тункинской системы впадин определяется неоднозначно. Выводы, сделанные по результатам структурно-геоморфологических исследований и реконструкции полей тектонических напряжений по данным о трещиноватости, различны. В первом случае преобладающим считается режим сдвига со сжатием С-СВ направления [Аржанин-

кова и др., 2007]. Во втором случае – на всех этапах развития Тункинской части БРЗ, включая современный, преобладает косое растяжение (доминирующая СЗ ось растяжения при СВ оси сжатия), а деформации сжатия отражают лишь локальные кратковременные вариации напряженного состояния. Для оценки современного поля напряжений использовалась также информация о фокальных механизмах землетрясений, которая характеризует текущий момент деформирования. Решения очагов довольно значительно отличаются в различных структурных блоках Тункинской ветви БРЗ с нарастанием доли сжатия с востока на запад и от центра впадин к их горному обрамлению [Лунина и др., 2007; 2009]. Деформации сжатия приурочены к границам блоков и к северному горному обрамлению, а деформации растяжения характерны для внутренних частей впадин при лево-сдвиговом перемещении по субширотным разломам. По сейсмологическим данным системы главных напряжений в очагах землетрясений, локализующихся во впадинах, чаще всего представлены сочетаниями близгоризонтального СЗ растяжения с наклонным или близвертикальным сжатием, в то время как на границах блоков и в хребтах доминируют близвертикальное растяжение и близгоризонтальное СВ сжатие [Аржанникова и др., 2007]. В целом, определяющую роль в напряженно-деформированном состоянии земной коры исследуемого района играют сдвиги.

Расчеты параметров сейсмотектонических деформаций (СТД) показали, что восточное окончание Тункинской системы впадин и район Южного Байкала находятся в режиме северо-западного субгоризонтального удлинения со сдвигом. Западнее Тунки преобладают сдвиговые деформации и усиливается роль северо-восточного сжатия. В районе остальных впадин доминирует деформация субгоризонтального укорочения со сдвигом. Южнее оз. Хубсугул в районе с пониженной сейсмической активностью преобладает деформация укорочения. Таким образом, расчет СТД отчетливо обозначил область перехода от структур растяжения БРЗ к структурам регионального сжатия Монголии и показал, что общая тенденция режима сейсмотектонического деформирования этого района сводится к сдвигу с устойчивым субгоризонтальным северо-восточным сжатием [Лунина и др., 2009].

Определенная упорядоченность общего структурного плана БРЗ, по всей вероятности, объясняется существенным влиянием разломной тектоники, имеющей разномасштабные уровни и различный возраст заложения [Шерман и др., 2002]. Крупнейшие разломные зоны (глубинные разломы) ограничивают ряд блоков, в совокупности определяющих главные особенности геологического строения южной части Восточной Сибири. Внутренняя структура блоков осложнена многочисленными разломами второго, третьего и более высоких порядков (регионального и локального уровней). Среди разломов рифтовой зоны преобладают СВ направления ($45\text{--}60^\circ$), менее развиты СЗ ($310\text{--}320^\circ$), при этом среди последних часть относится к категории скрытых нарушений, часть проявляется фрагментарно.

Рифтовые впадины ограничены региональными разломами (Приморский, Тункинский и др.), имеющими ярко выраженную позднекайнозойскую активизацию и характеризующимися, в большинстве случаев, сбросовыми или сбросо-сдвиговыми смещениями. Сдвиговая компонента наиболее четко выявляется для контролирующих впадины разломов ЮЗ и СВ флангов БРЗ. Субширотные сдвиги имеют в их пределах левостороннюю составляющую, субмеридиональные – правостороннюю.

Разломы, в частности, контролирующие сейсмический процесс, характеризуются различными возрастами начального заложения и различаются современной интенсивностью движений. На конкретные сейсмические события влияют многие параметры разломов (длина разрыва, кинематика и амплитуда смещений и т.д.). Однако сейсми-

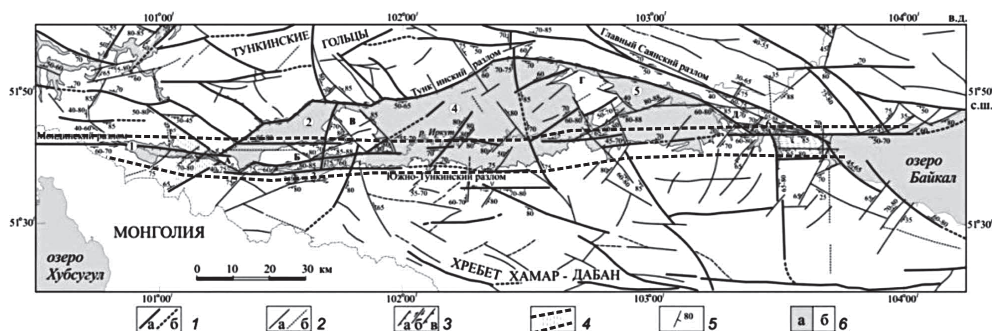


Рис. 1. Карта разломно-блокового строения земной коры Тункинской впадины БРЗ и ее горного обрамления.

1 – разломы достоверные (а) и предполагаемые (б); 2 – разломы региональные (а), локальные (б); 3 – сбросы (а), сдвиги (б), взбросы (в); 4 – положение зоны сдвиговой деструкции; 5 – направление и угол падения разлома; 6 – впадины (а) и выходы фундамента (б) [Шерман и др., 2002].

ческий процесс в целом контролируется подвижностью всего ансамбля разноранговых активных разломов конкретного сейсмического пояса или области. Поэтому важным методом исследования территории является визуальное и автоматизированное дешифрирование линеamentной сети в условиях БРЗ, тесно взаимосвязанной с разломной сетью (технология LESSA [Автоматизированный..., 1988; Zlatopolsky, 1997]).

Для поисков закономерностей структурной организации сейсмического процесса в сейсмических поясах использованы представления о деструктивных зонах литосферы, интегрирующих разноранговые разломы (рис. 1), характеризующиеся разнообразными признаками современной активности [Адушкин и др., 2011; Шерман и др., 2002]. В пределах деструктивной зоны сейсмический процесс протекает неравномерно в пространстве и во времени. Концентрация сильных сейсмических событий фиксируется вдоль оси деструктивной зоны. Преобладающие массы более слабых событий отмечаются в областях динамического влияния разноранговых разломов. При этом многочисленные геологически закартированные разрывы остаются асейсмичными в границах той же сейсмической области.

Результаты автоматизированного линеamentного анализа

Для Тункинской ветви рифта был выполнен автоматизированный линеamentный анализ мозаики цифровых космоснимков с разрешением около 30 м по технологии LESSA с выделением малых и протяжённых линеamentов и построением карт статистических характеристик пространственного распределения малых линеamentов. Разумеется, линейные элементы космических изображений далеко не всегда отвечают разрывным нарушениям на местности, однако хорошая статистическая пространственная корреляция этих объектов многократно демонстрировалась. Техногенное зашумление космоснимков для Тункинского региона варьирует от умеренного до незначительного. Проявление разрывных деформаций на космических снимках объясняется тем, что процессы, происходящие в разрывных зонах, воздействуют на вышележащие слои, предопределяя особенности геологического строения осадочных пород, рельефа (через избирательную денудацию) и почвенно-растительного слоя.

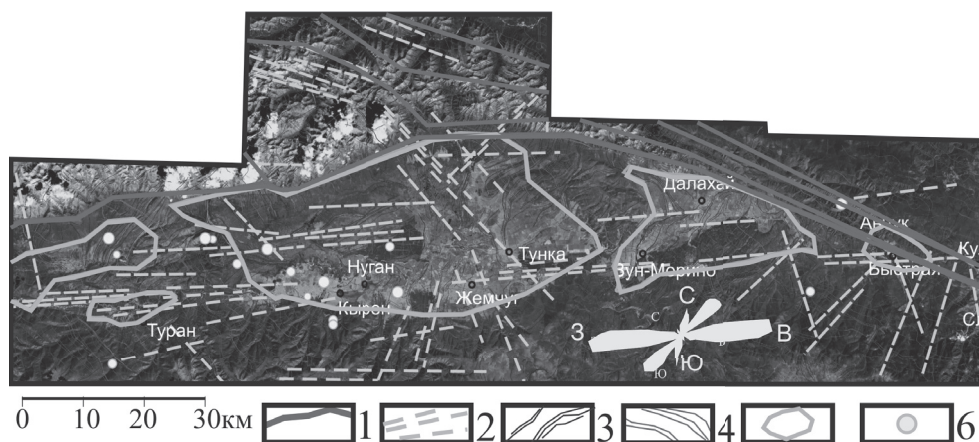


Рис. 2. Схема автоматизированного дешифрирования Тункинской впадины БРЗ.

1 (здесь и на рисунках 3 и 5) – глубинные разломы, 2 – протяженные линеаменты, 3 – линии вытянутости роз-диаграмм, 4 – линии, ортогональные линиям вытянутости, 5 – внутренние впадины, 6 – эпицентры сильных землетрясений.

Считается, что в рельефе линеаменты выражаются закономерно ориентированными зонами, образованными прямолинейными границами горных хребтов и кряжей, берегов озер и крупных болот, спрямленными участками речных и ледниковых долин, цепочками просядок различного генезиса и пр. В активной Байкальской рифтовой зоне большинство линеаментов тектонически предопределено как в пределах осадочного чехла впадин, так и в пределах выходов консолидированного фундамента в бортах рифта.

На рис. 2 показаны результаты автоматизированного дешифрирования наиболее выраженных линеаментов. Хорошо видно преобладание линеаментов субширотного простирания, входящих в сдвиговую зону деструкции, установленную геологическими и сейсмологическими методами. На рис. 3 показаны те же линеаменты, что и на рис. 2, но на фоне автоматически полученной карты плотности всех линеаментов субширотного простирания. Прослеживается тяготение эпицентров к сгущению максимумов плотности линеаментов этого направления. В западной части Тункинского рифта видна наибольшая плотность малых субширотных линеаментов, приуроченная к межвпадинным перемячкам и выступам фундамента или выходам базальтов внутри впадин. Эта же закономерность устанавливается и при визуальном дешифрировании для разломов [Лунина, 2009].

На рис. 4 приведена интерпретация элементов напряжённого состояния по геологическим данным, выполненная в Институте земной коры (Иркутск) [Лунина, 2009] по методу Гущенко О.И. [Гущенко, 1979; 1999]. Идентификация структурно-геологических условий Тункинской впадины БРЗ проведена на основе автоматизированного дешифрирования (технология LESSA) методом линий вытянутости (линеamentных форм), то есть анализа значимых удлинений роз-диаграмм малых линеаментов [Zlatopolsky, 1997] (рис. 5). Этот метод основан на наличии статистической связи формы (прежде всего направления удлиненности) розы-диаграммы малых линеаментов наблюдаемой в скользящем окне с направлением укорочения (или удлинения) при деформировании, если большинство линеаментов в окне имеют тектоническую природу. Последнее условие для рассматриваемого региона БРЗ выполняется.

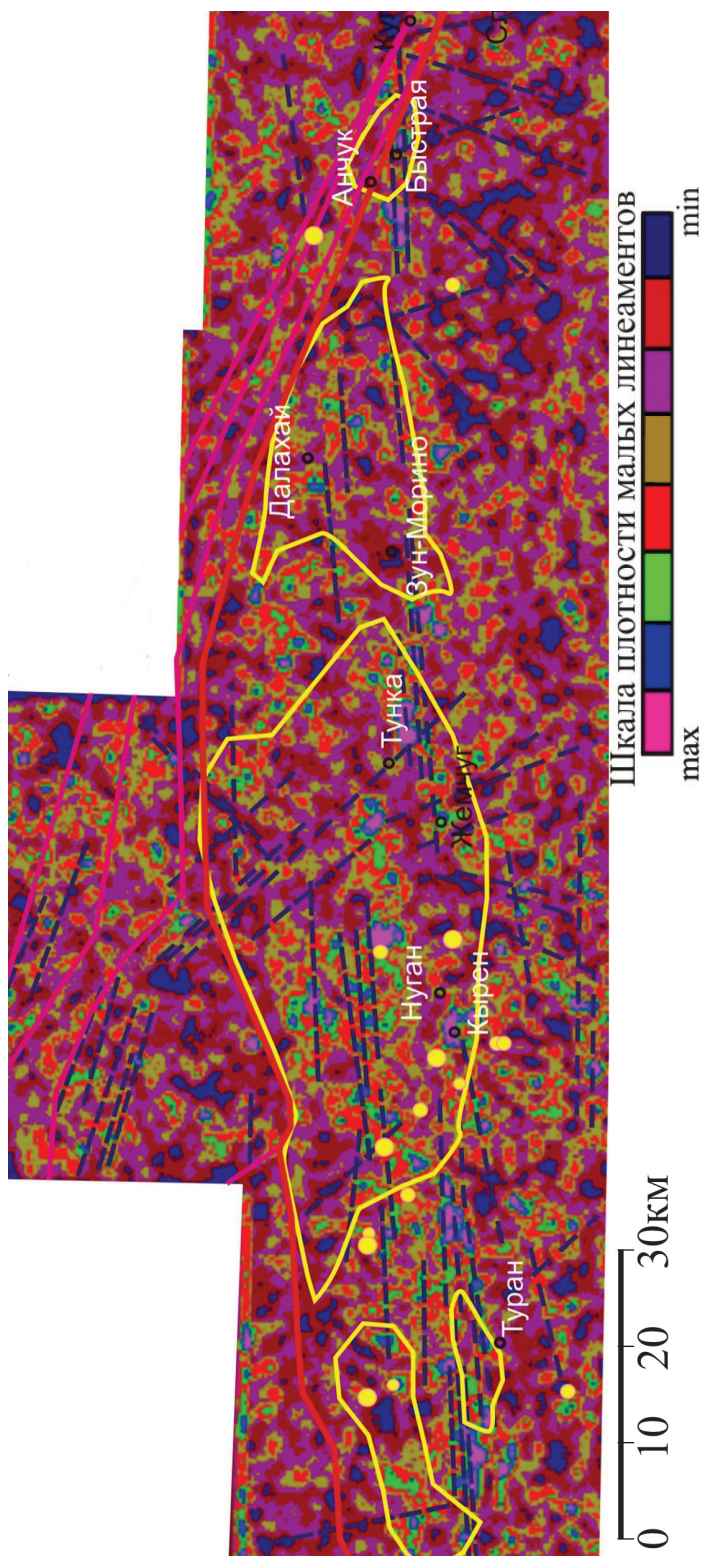


Рис. 3. Схема плотности малых линейных элементов Тункинской впадины БРЗ субширотного простирания.

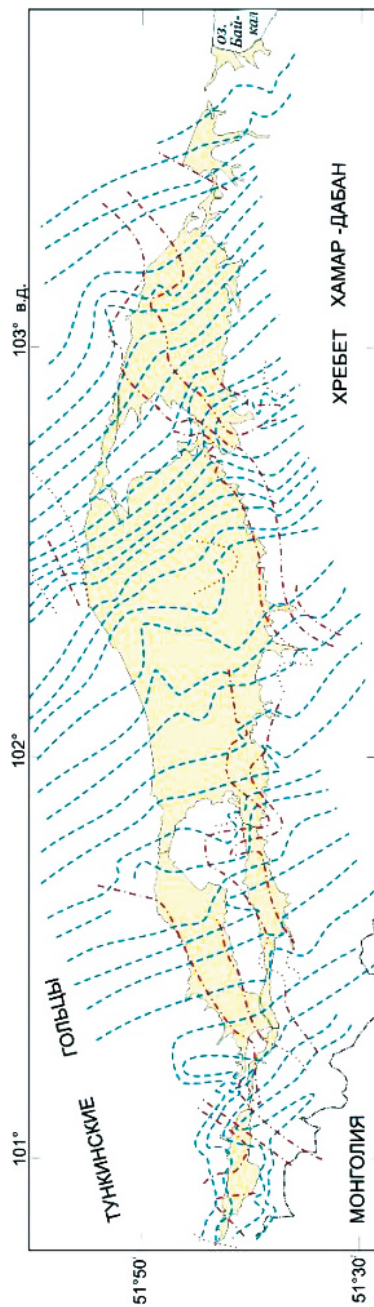


Рис. 4. Схема траекторий главных нормальных напряжений растяжения и сжатия Тункинской впадины БРЗ.

Синие пунктирные линии – нормальные напряжения растяжения, красные – напряжения сжатия [Шерман и др., 2002].

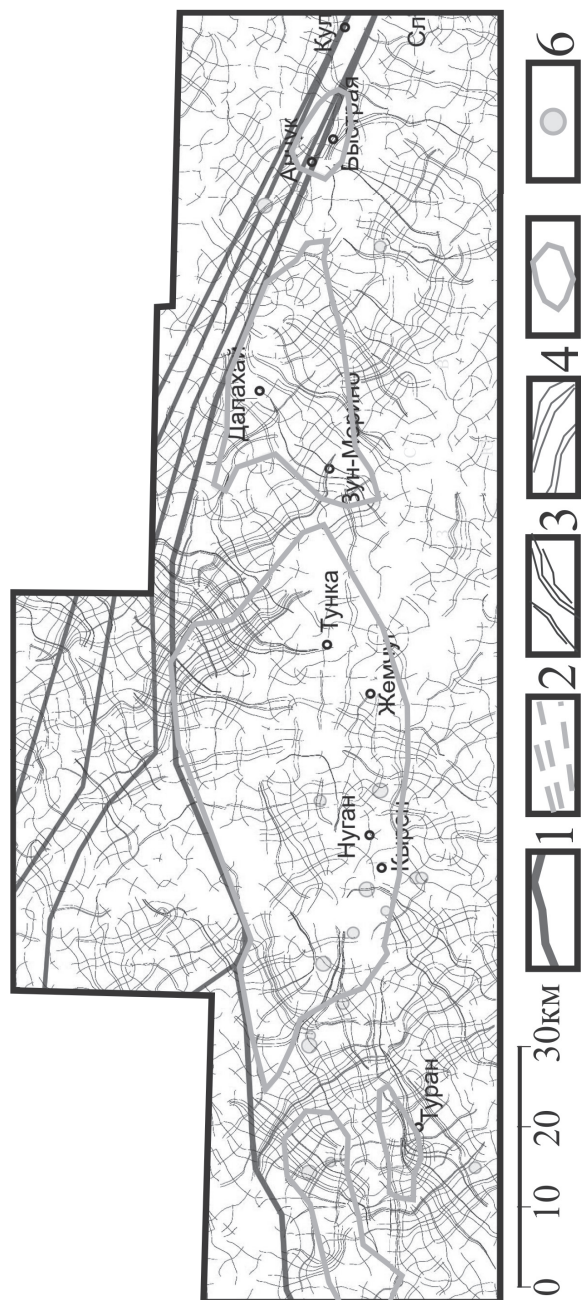


Рис. 5. Схема линейных форм Тункинской впадины БРЗ.

Видно, что направления траекторий растяжения, полученные различными методами линеаментного анализа (рисунки 4 и 5), очень близки между собой и находятся в хорошем согласии с определением векторов тектонических сил по сейсмологическим данным. Из этого следует, что технология LESSA может быть использована как предварительный быстрый метод анализа некоторых характеристик напряжённого состояния. Применение такой технологии автоматизированного дешифрирования даёт сопоставимые с наземными наблюдениями данные по тектонической раздробленности. Реализация этого процесса для построения роз с использованием различных окон осреднения дала близкие картины, что свидетельствует об устойчивости полученного результата в довольно широком диапазоне масштабов.

На рис. 2 показана сводная по территории исследования роза-диаграмма всех протяжённых линеаментов, выделенных при автоматизированном дешифрировании при общем, достаточно высоком пороге выраженности. Виден самый большой луч, представляющий систему линеаментов субширотной зоны деструкции (континентального «трансформного» разлома). Второй по величине луч вытянут в направлении максимальных сжимающих усилий (то есть трещинные зоны в условиях растяжения). Третий луч, вероятно, представляет сопряжённую систему сколов. Такая интерпретация находится в хорошем соответствии с теоретическим видом розы-диаграммы, соответствующей тектонофизической модели формирования БРЗ, развитой А. Шемендой на основе экспериментов с модельными материалами [Chemenda et al., 2002]. Это подтверждает геодинамическую модель формирования генеральных структур Байкальской рифтовой зоны, основанную на представлении о пластическом разрушении литосферы при одноосном растяжении, то есть показывает преобладание пассивного рифтинга, несмотря на хорошо выраженное сводообразование.

Заключение

Подтверждено предположение о сдвиговой деструкции как основном механизме разломного структурообразования на южном фланге БРЗ и второстепенном механизме, неустойчивом во времени режиме сжатия – растяжения. Эпизоды растяжения сопровождалась вулканизмом, а сжатия – формированием взбросов в обрамлении Тункинской впадины. Древний структурный план территории играл пассивную роль в кайнозойское время с частичной реактивацией разломов в поле напряжений плиоцен-четвертичного времени на границе Сибирской и Амурской субплит.

Проведённое сопоставление результатов, полученных независимыми методами (наземные наблюдения и измерения трещиноватости, сейсмологические наблюдения, автоматизированный линеаментный анализ космических снимков, тектонофизическое моделирование), показывает их хорошую согласованность и, соответственно, применимость автоматизированного линеаментного анализа как одного из методов при исследованиях напряжённого состояния неотектонически активных регионов и верификации геодинамических моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 10-05-00917-а, 11-05-00871-а).

Литература

- Автоматизированный анализ* природных линеаментных систем. Л.: ВСЕГЕИ (Всероссийский геологический институт). 1988. 131 с.
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Локтев Д.Н., Соловьев С.П., Харламов В.А.* Инструментальные наблюдения за геофизическими полями Тункинской рифтовой зоны // Межгеосферные взаимодействия: сб. науч. труд. ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2011. С. 29–39.
- Аржанникова А.В., Мельникова В.И., Радзиминович Н.А.* Позднечетвертичный и современный режимы деформирования западной части тункинской системы впадин по структурно-геоморфологическим и сейсмологическим данным // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 4. С. 391–400.
- Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Дашевский Ю.А.* Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодезическом полигоне // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1484–1496.
- Гущенко О.И.* Кинематический принцип относительной хронологии палеонапряжений (основной алгоритм тектонического стресс-мониторинга) // Теоретические и региональные проблемы геодинамики. М.: Наука. 1999. С. 108–125.
- Гущенко О.И.* Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 7–25.
- Иванченко Г.Н., Соловьев С.П., Локтев Д.Н.* Комплексные исследования активности тектонических нарушений в зоне Тункинской рифтовой впадины // Проблемы взаимодействующих геосфер: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2009. С. 123–130.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Шерман С.И.* Вариации полей напряжений Тункинского рифта (юго-западное Прибайкалье) // Геотектоника. 2007. № 3. С. 69–96.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н.* Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. Новосибирск.: Академическое изд-во «Гео», 2009. 316 с.
- Семинский К.Ж.* Главные факторы развития впадин и разломов Байкальской рифтовой зоны: тектонофизический анализ // Геотектоника. 2009. № 6. С. 52–69.
- Уфимцев Г.Ф., Щетников А.А., Филинов И.А.* Новейшая геодинамика Тункинского рифта (Прибайкалье) // Литосфера. 2006. № 2. С. 95–102.
- Флоренсов Н.А.* О неотектонике и сейсмичности Монголо-Байкальской горной области // Геология и геофизика. 1960. № 1.
- Шерман С.И., Демьянович В.М., Лысак С.В.* Новые данные о современной деструкции литосферы в Байкальской рифтовой зоне // Докл. РАН. 2002. Т. 387. № 4. С. 533–536.
- Malkin, B.V., Shemenda, A.I., 1991.* Mechanism of rifting: considerations based on results of physical modeling and on geological and geophysical data // Tectonophysics, 199, p. 193–210.
- Chemenda, A., J. Deverchere, and E. Calais,* Three-dimensional laboratory modelling of rifting: application to the Baikal rift, Russia // Tectonophysics, 356/4, p. 253–273, 2002.
- Zlatopolsky A.* Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Computers & Geosciences. 1997. V. 23. No. 1. P. 45–62.
- Zonenshain, L.P., u L.S. Savostin,* Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // Tectonophysics, 76, p. 1–45, 1981.