

Оригинальная статья / Original article

УДК 551.24.035+551.4.044

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-79-98>

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ РАЗНОРАНГОВЫХ ЗОН РАСТЯЖЕНИЯ В РЕЛЬЕФЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ И ИХ ПРИРОДНЫХ АНАЛОГОВ

© А.С. Черемных^а, А.А. Каримова^б

^{а,б}Институт земной коры СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

РЕЗЮМЕ. Цель. Изучить закономерности отражения структуры межблоковых зон растяжения в рельефе на различных масштабных уровнях тектонической делимости земной коры Байкальского рифта. **Методы.** В работе использовали физическое моделирование на упруго-пластичном материале (глинистая паста) с последующим построением цифровых моделей рельефа поверхностей опытных образцов. Полученные цифровые модели рельефа анализировали путем построения распределений градиента вертикальных движений. Аналогичным способом исследовали общедоступные цифровые модели рельефа природного аналога экспериментальных моделей – Байкальского рифта. Далее проводили сравнение данных, полученных при анализе двух типов цифровых моделей. **Результаты.** Получены и проанализированы распределения градиента вертикальных движений для эксперимента и градиента рельефа СЗ и ЮВ флангов Байкальского рифта. В поле градиента выделены участки, отражающие разноранговые зоны растяжения и их внутреннюю структуру. Предложена методика выделения межблоковых зон различного иерархического уровня на основе градиента рельефа природных зон. **Выводы.** Дизъюнктивные зоны, образующиеся при растяжении, и их структура отражаются в распределении градиента повышенными значениями параметра. Максимальными значениями параметра отражается магистральный сместитель зоны, несколько меньшими значениями выделяются разрывы второго порядка. Сдвиговые разрывы, образующиеся при растяжении, не выделяются особыми значениями градиента, их можно проследить по смещению локальных максимумов, приуроченных к другим трещинам. В большинстве случаев выделенные закономерности справедливы для экспериментальных и природных зон растяжения.

Ключевые слова: межблоковая зона, сбросовая разломная зона, физическое моделирование, цифровые модели рельефа, градиент вертикальных движений, градиент рельефа.

Информация о статье. Дата поступления 2 октября 2017 г.; дата принятия к печати 20 декабря 2017 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2018 г.

Формат цитирования. Черемных А.С., Каримова А.А. Особенности проявления разноранговых зон растяжения в рельефе экспериментальных моделей и их природных аналогов // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 79–98. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-79-98

MANIFESTATION FEATURES OF DIFFERENT RANK EXTENSION ZONES IN THE RELIEF OF EXPERIMENTAL MODELS AND THEIR NATURAL ANALOGUES

© A.S. Cheremnykh, A.A. Karimova

Institute of the Earth's crust SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

^аЧеремных Алексей Сергеевич, ведущий инженер лаборатории тектонофизики,
e-mail: acherem@crust.irk.ru

Aleksey S. Cheremnykh, Leading Engineer of the Tectonophysics Laboratory, e-mail: acherem@crust.irk.ru

^бКаримова Анастасия Алексеевна, ведущий инженер лаборатории тектонофизики,
e-mail: tarasova2712@gmail.com

Anastasia A. Karimova, Leading Engineer of the Tectonophysics Laboratory, e-mail: tarasova2712@gmail.com

ABSTRACT. The **Purpose** of the work is to study the reflection patterns of the interblock tension zones structure in relief at various scale levels of the Earth's crust tectonic divisibility in the Baikal rift. **Methods.** The study involves the analogue modeling on elastic-plastic material (clay paste) with the following construction of digital models of the control sample surface relief. The resulting digital terrain models are analyzed by constructing the distributions of vertical motion gradient. The similar method is used to study the readily available digital terrain models of the natural analogue of the experimental models of the Baikal rift. The data obtained in the analysis of the two types of digital models are compared. **Results.** Distributions of the gradient of vertical motions for the experiment and the relief gradient of the north-west and south-east flanks of the Baikal rift have been obtained and analyzed. Sections reflecting the extension zones of different ranks and their internal structure have been distinguished in the gradient field. A procedure has been proposed to identify the interblock zones of different hierarchical levels based on the relief gradient of Earth's fault zones. **Conclusions.** The fault zones and their structure formed under extension are reflected in gradient distribution by the increased parameter values. The maximum values of the parameter are characteristic of the main fault of the zone, smaller values are referred to second-order cracks. Strike-slip cracks formed under extension are not demonstrated by special gradient values but they can be traced by the displacement of local maxima associated with other cracks. In most cases, found regularities are valid for experimental and natural extension zones.

Keywords: *interblock zone, fault zone, analogue modeling, digital elevation models, gradient of vertical motions, relief gradient*

Article info. Received 2 October 2017; accepted for publication 20 December 2017; available online 30 March 2018.

For citation. Cheremnykh A.S., Karimova A.A. Manifestation features of different rank extension zones in the relief of experimental models and their natural analogues. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits], 2018, vol. 41, no. 1, pp. 79–98. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-79-98

Введение

При характеристике разломно-блоковой структуры земной коры обычно используют такие понятия, как «межблоковая» и «разломная» зоны. В рамках данной статьи они имеют аналогичный смысл и обозначают зону контактирования блоков, которая состоит из тектонитов главного сместителя, а также значительно большего по размерам объема горных пород, в котором имеют место генетически связанные с ее формированием пластические и разрывные деформации [1]. Разница двух понятий заключается в относительном ранге описываемых ими дизъюнктивных структур. Как правило, под межблоковой зоной понимается структура более высокого ранга по отношению к разломной зоне.

Известно, что любая дизъюнктивная зона характеризуется наличием внутренней структуры, под которой понимается совокупность специфических элементов, входящих в ее состав [1]: разрывы различного морфогенетического

типа, дуплексы сжатия и растяжения, складки и т. д. Каждый из элементов структуры вносит определенный вклад в формирование тектонического рельефа зоны. В зависимости от присутствия и количества определенных элементов во внутренней структуре зоны ее рельеф будет существенно различным.

Предыдущие работы [2] показали, что изучение блоковой структуры земной коры весьма эффективно осуществляется комплексом геолого-геофизических методов. Дистанционные геоморфологические методы, входящие в состав комплекса, являются его необходимой составляющей. Использование современных данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий позволяет достаточно быстро и равноценно исследовать значительные по размерам территории в отличие от большинства геологических и геофизических методов, реализация которых осуществляется по профилю (маршруту) или связана с конкретной точкой наблюдения. Однако при этом глав-

ным недостатком геоморфологических методов является неоднозначность решений, полученных при анализе рельефа, поскольку его формирование происходит в результате не только разломообразования, но и целого комплекса эндо- и экзогенных процессов. Поэтому, чтобы повысить их информативность при изучении структуры природных межблоковых зон, эффективно сначала провести исследования на экспериментальных объектах методом физического моделирования. Это позволяет на эталонных объектах установить наиболее общие закономерности проявления разноранговых зон в рельефе, которые в дальнейшем будут использованы для выделения разломно-блоковой структуры земной коры природного региона.

В качестве природного аналога в данной работе был выбран Байкальский рифт (Байкальская межблоковая зона), который формируется между Сибирским кратоном и Забайкальским блоком в условиях растяжения литосферы. Структура рифта хорошо изучена с применением геологических, геофизических и других методов исследования, в том числе посредством анализа рельефа [2–14]. Это поможет отработать методику дешифрирования природных разломных зон и позволит сравнить полученные результаты с положением на местности известных дизъюнктивов.

Таким образом, целью исследования было изучить закономерности отражения структуры межблоковых зон растяжения в рельефе на различных масштабных уровнях тектонической делимости земной коры Байкальского рифта. С прикладной точки зрения исследование внутренней структуры дизъюнктивных зон может быть полезно при поисках топливных и рудных полезных ископаемых. В первом случае установлено, что залежи углеводородов могут быть приурочены к определенным трещинам в структуре разломной зоны в зависимости от их

генетического типа и, как следствие, раскрытости и проницаемости [15]. Во втором случае месторождения рудных полезных ископаемых часто залегают в местах изгибов магистрального шва разломной зоны, а также в местах сочленения с опережающими его развитие сместителями второго порядка [16].

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

– отработать методику воспроизведения обстановки растяжения в эксперименте для получения цифровой модели рельефа;

– провести исследование цифровой модели рельефа экспериментальной зоны растяжения посредством анализа пространственного распределения градиента вертикальных движений;

– используя данные космического зондирования, провести построение и анализ распределения градиента рельефа для территории Байкальского рифта;

– сравнить выделенные закономерности отражения структуры зон в эксперименте и природных условиях;

– по результатам сравнения отработать методику, направленную на выделение и анализ структуры зон растяжения земной коры.

Методика эксперимента

Общая методика экспериментов по моделированию крупных разломных зон разработана в лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН С.И. Шерманом, С.А. Борняковым и К.Ж. Семинским [1, 17, 18]. Показано, что физическая модель из глинистой пасты при деформировании в лабораторных условиях проявляет упруго-пластичные свойства подобно литосфере в процессах крупномасштабного разломообразования [1]. Все эксперименты по изучению зон растяжения проводились на специальной установке «Разлом», которая предназначена для моделирования разнообразных типов тектонических структур путем перемещения в различных

направлениях ее отдельных частей – штампов. В качестве модельного материала использовалась однородная глинистая паста, удовлетворяющая основным критериям подобия при проведении экспериментов [17, 19]. В соответствии с ними 1 см модели соответствует 1 км в природной обстановке. Для достижения однотипности в формировании внутренней структуры зоны растяжения вязкость пасты поддерживалась одинаковой для всех экспериментов.

Модель, состоящая из одного слоя глинистой пасты, имела размеры 60×60 см и находилась в квадратных в плане рамках, препятствующих растеканию пасты. Она располагалась на двух штампах установки, один из которых смещался в горизонтальном направлении с постоянной скоростью (5 мм/мин), создавая обстановку растяжения для центральной части модели. Внутренние поверхности рамок обрабатывались вазелином, чтобы уменьшить трение о них глинистой пасты, которое увеличивает влияние краевых эффектов, негативно сказывающееся на формировании структуры зоны растяжения. С помощью двух подложек, расположенных друг на друге и закрепленных на штампах установки «Разлом» (подвижный и неподвижный), исключался эффект провисания центральной части модели при ее растяжении.

Результатом эксперимента являлось образование в модели межблоковой зоны растяжения, отражающейся в рельефе двумя встречно направленными по падению уступами со сравнительно небольшим опущенным блоком между ними (рис. 1). В целом такая структура представляет грабен. Необходимо отметить, что центральная впадина растяжения также имеет разломное строение, хотя разрывы в ее пределах не доходят до поверхности модели. Это явление возникает в силу физической ограниченности модели снизу двумя подложками; при их отсутствии на месте центральной

впадины находилась бы крупная зияющая трещина. Последнее не характерно для природной обстановки, где центральная трещина растяжения обычно заполнена осадками и/или водой. Таким образом, применение подложек, дающих лишь небольшую свободу вертикального перемещения глинистому субстрату, в большей степени соответствует картине деформаций природного объекта. Перемещение штампов установки «Разлом» происходило до момента, когда разломные зоны в структуре растяжения достигали стадии полного разрушения [1], то есть до формирования в их пределах магистральных сместителей.

Измерения рельефа поверхности модели выполнялось по сети из 13 профилей по 50 пикетов каждый, проведенных вкрест простираения межблоковой зоны растяжения. Сеть профилей охватывала практически всю экспериментальную модель по длине и ширине за исключением краевых частей. Расстояние между профилями – 3 см, между пикетами – 1 см. На каждом пикете измерялось значение высоты рельефа с точностью ±1 мм при помощи лазерного дальномера, закрепленного на одной высоте относительно исходной поверхности экспериментальной модели. На основе измеренных значений отметок высот был рассчитан средний градиент изменений углов наклона рельефа (градиент вертикальных движений) для каждого пикета по формуле

$$|grad| = \frac{h_A - h_B}{l_{AB}},$$

где $h_A - h_B$ – разность отметок высот двух соседних пикетов профиля, м; l_{AB} – расстояние между ними, м. Заключительным этапом обработки экспериментальных данных было построение распределения градиента в изолиниях с помощью современных программных средств (см. рис. 1).

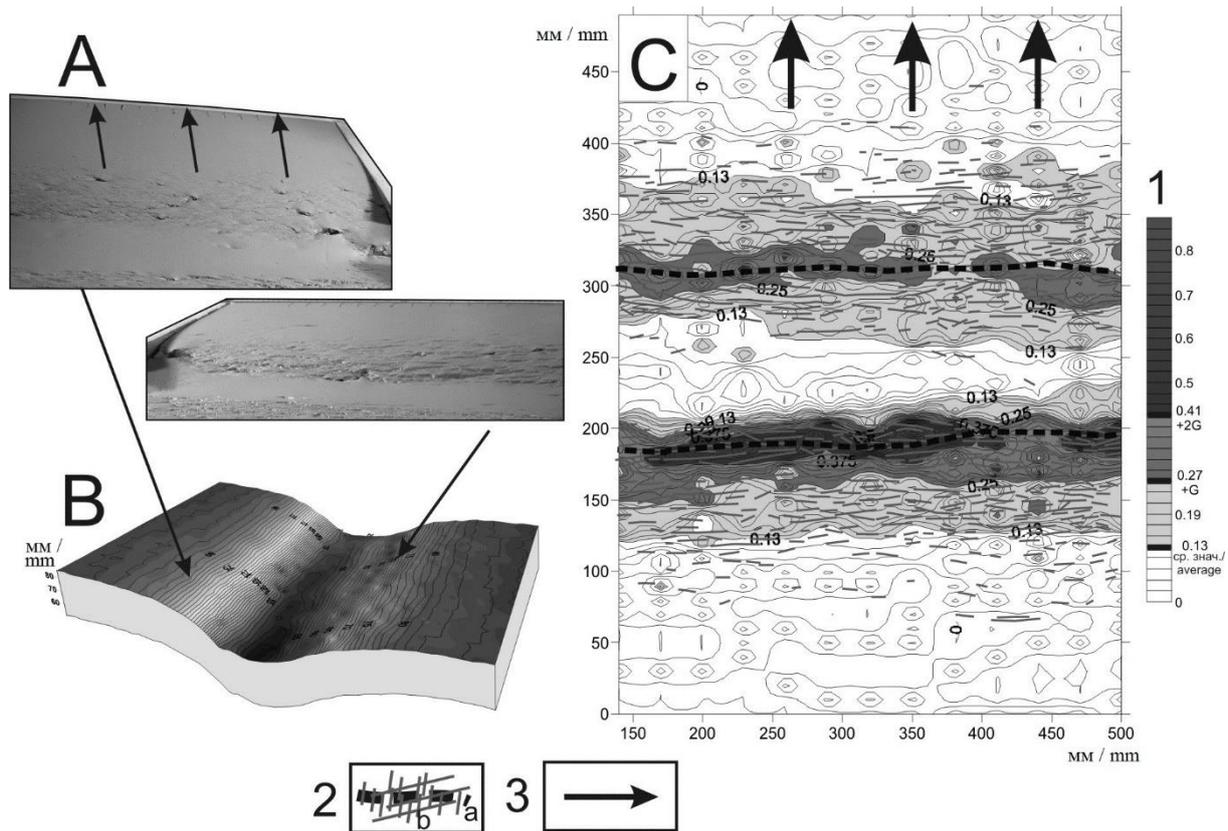


Рис. 1. Результаты физического моделирования зоны растяжения в упруго-пластичной модели:
 А – фотографии, отражающие особенности рельефа сбросовых зон над разными штампами установки «Разлом»; В – цифровая модель рельефа; С – распределение величин градиента вертикальных движений на поверхности модели в изолиниях
 1 – шкала величин градиента вертикальных движений; 2 – разрывы, выделенные на поверхности модели (а – магистральный сместитель, b – сопутствующие разрывы);
 3 – направление перемещения активного штампа установки «Разлом»

Fig. 1. Results of extension zone analogue modeling in an elastic-plastic model:

A – images reflecting relief features of the fault zones above the various stamps of the “Razlom” installation; B – digital terrain model; C – distribution of the values of the gradient of vertical motions on the model surface in isolines

1 – scale of vertical motion gradient values; 2 – faults identified on the model surface (a – main fault, b – concomitant cracks); 3 – movement direction of “Razlom” installation active stamp

Методика построения цифровых карт рельефа природных регионов

В основу построения карт природных аналогов были положены цифровые модели рельефа Aster GDEM2 [20]. Эти модели обладают пространственным разрешением выше среднего (15–30 м) и сравнительно небольшой ошибкой по высоте, что приемлемо для подобного рода исследования. На цифровых моделях рельефа Aster СЗ и ЮВ флангов Байкальского рифта была проведена сеть профи-

лей вкрест простирания Байкальской впадины; шаг между пикетами в профиле составлял 1500 м; расстояние между профилями – 1500 м. Далее для каждого пикета в сети профилей рассчитывался градиент изменений углов наклона рельефа (градиент рельефа) по формуле, приведенной выше. По полученным значениям градиента рельефа при помощи современных программных средств строилась цифровая карта распределения данного параметра в изолиниях. При построении распределений градиента рельефа для

территории Байкальского рифта использовались различные параметры ячейки интерполяции. В дальнейшем из всех вариантов карт выбирался наиболее оптимальный вариант по степени сглаженности и детальности построения. Выбранная карта дополнялась линеаменами (спрямленными элементами рельефа), выявленными при анализе модели Aster. Эти линеаменты были разделены на мелкие, крупные и протяженные, т. е. отнесены к различным масштабным рангам.

Несмотря на то, что градиент вертикальных движений для экспериментальных моделей и градиент рельефа для природных объектов рассчитывались по одной формуле, они не равнозначны по сути. В эксперименте отсутствует влияние экзогенных процессов, что дает право назвать рассчитанный параметр градиентом вертикальных движений. В случае с природными территориями для построения градиента вертикальных движений необходимо сначала выделить экзогенно-активный слой, а затем произвести расчет по рассматриваемой формуле [4, 14, 21]. Однако при таком подходе происходит небольшое сглаживание рельефа, которое не отразится при выделении границ крупных межблоковых зон (таких, как Байкальская в целом), но может повлиять на внутреннее строение более мелких (Приморская, Джидино-Удинская). В целом с увеличением ранга разломной зоны влияние сглаженности рельефа проявляется сильнее. Поэтому, чтобы исследовать зоны различного ранга равнозначно, мы производим построение градиента рельефа, т. е. без выделения экзогенно-активного слоя.

Анализ экспериментальных моделей

Анализ экспериментальных моделей проводился в несколько этапов. На начальном этапе по фотографии поверхности (см. рис. 1, А) модели были зафиксированы все образовавшиеся разрывы

(см. рис. 1, С). Затем сеть разрывов сопоставлялась с цифровой моделью рельефа (см. рис. 1, В) и распределением градиента (см. рис. 1, С). Считалось, что значения градиента выше среднего уровня являются аномальными, отражают границы разломной зоны и влияние на рельеф ее внутренней структуры. Этот допуск основан на предыдущих работах, касающихся сдвиговых зон [22], где показано, что их границы и внутренняя структура хорошо отражаются в поле градиента значениями выше среднего уровня. Также для наглядности в распределении параметра были отражены уровни стандартного и двух стандартных отклонений от среднего.

Эксперимент показал, что межблоковая зона растяжения отчетливо выделяется грабеноподобной структурой, главными элементами которой являются сбросовые зоны, образующие уступы в рельефе (см. рис. 1). Интенсивность вертикальных перемещений по разрывам в пределах разломных зон неодинакова. Это связано с тем, что один штамп установки оставался неподвижным в ходе эксперимента. Менее интенсивные перемещения наблюдались в зоне разлома, находящейся над подвижным штампом, а более интенсивные перемещения – над неподвижным.

В поле градиента межблоковая зона отражается двумя участками с аномальными значениями и областью минимальных значений, находящейся между ними (см. рис. 1, С). Каждому из двух участков соответствует сбросовая разломная зона, отражающаяся уступом в рельефе модели, а области, заключенной между ними, – впадина растяжения. В отличие от рельефа градиент более однозначно выделяет границы разломных зон, магистральные сместители и отдельные разрывы.

Распределение градиента неравномерно не только в пределах всей межблоковой зоны, но и в каждой из разлом-

ных зон. В масштабе межблоковой зоны неравномерность связана с входящими в ее структуру двумя сбросовыми зонами и участком соответствующего впадине растяжения, о котором упоминалось выше. Также неравномерность распределения градиента для межблоковой зоны отражается в разнице величин параметра в сбросовых разломных зонах, что связано с интенсивностью перемещений в их пределах. Более высокие значения наблюдаются в разломной зоне над неподвижным штампом установки. Это можно отчетливо проследить по уровню стандартного отклонения в распределениях параметра.

В рамках отдельно рассматриваемой сбросовой зоны распределение градиента неравномерно в поперечном и продольном направлениях, что отражает сложность их внутреннего строения. Поперечная неравномерность связана с магистральным сместителем, а также с опережающими его развитие сбросовыми разрывами более высокого порядка. Магистральный сместитель выделяется максимальными значениями градиента, которые смещены от оси разломной зоны к периферии со стороны впадины растяжения (см. рис. 1). Более мелкие опережающие сбросы отражаются небольшими локальными максимумами градиента с меньшими, чем у магистрального сместителя, значениями.

Необходимо заметить, что направление падения опережающих сбросов может быть противоположным. Часть разрывов имеет наклон в ту же сторону, что и магистральный сместитель (в сторону центральной впадины растяжения), а другая часть – в противоположную. Поскольку в механическом отношении сброс является сдвигом со смещением по падению, описанные разрывы являются трещинами R- и R'-типа соответственно [1, 23]. Влияние на распределение и величину градиента вертикальных движений разрывов R-типа существенно

выше, чем у разрывов R'-типа, однако оно несравнимо с воздействием на параметр магистрального сместителя. Данный вывод справедлив для обеих сбросовых зон, однако у зоны над неподвижным штампом значения градиента в пределах всех разрывов будут в целом несколько выше, чем у аналогичных, сформировавшихся над подвижным штампом.

В продольном направлении неравномерность распределения градиента связана главным образом с небольшими сдвиговыми разрывами второго ранга по отношению к общему растяжению модели. Они не выделяются определенными значениями параметра, однако их можно проследить по смещению максимумов, приуроченных к области магистрального шва зоны (см. рис. 1, С). Другие структурные элементы сбросовой зоны выражены слабо или не проявлены в рельефе и градиенте вертикальных движений. В целом данный подход с использованием физического моделирования дизъюнктивных зон и последующим комплексным анализом цифровых моделей рельефа и распределений градиента вертикальных движений для экспериментальных поверхностей показал свою высокую эффективность при подобных исследованиях. Полученные результаты в дальнейшем будут служить хорошей основой для выделения схожих закономерностей у природных аналогов и взаимного сравнения эксперимента и природы.

Анализ природных объектов и их сравнение с экспериментальными моделями

Анализ территории Байкальского рифта подобно анализу экспериментальных данных проводился в несколько этапов. Первоначально на цифровой модели рельефа Aster были выделены мелкие линеаменты, входящие в границы исследуемого района. Далее проводилась пошаговая генерализация выделенных разрывов: при кулисном расположении сравнительно мелкие линеаменты объ-

единялись в единую более крупную структуру. Для объективного отражения разломной сети территории выявленные таким образом линеаменты сопоставлялись с крупными разрывными структурами, представленными на геологических картах и схемах изучаемого региона [6, 9]. В последнюю очередь проводился расчет и выполнялось построение распределения градиента рельефа.

Байкальский рифт в данной работе выступает как эталонный объект для сравнительного анализа. Его структура детально изучена различными геолого-геофизическими методами [11], установлены границы составляющих зон растяжения различного ранга. Рифт имеет сложное строение, и вначале необходимо сопоставить природные и экспериментальные зоны на основе теории подобия. Природными аналогами структур, воспроизведенных в эксперименте, являются межблоковые и разломные зоны Байкальского рифта, которые, согласно принятой нами классификации [11], можно разделить на три ранга. На глобальном уровне это плечи Байкальского рифта и рифтовая впадина оз. Байкал, составляющие в совокупности Байкальскую межблоковую зону, а также и некоторые другие межблоковые зоны северовосточного простирания данного иерархического уровня (например, Монголо-Охотская). Этому масштабному уровню соответствует зона растяжения, формирующаяся во всем объеме экспериментальной модели (см. рис. 1). К трансрегиональному уровню следует относить Обручевскую, Черско-Баргузинскую, Джидо-Витимскую и другие сбросовые разломные системы (рис. 2, В). При переходе от природной ситуации к экспериментальной модели они соответствуют разломным зонам, образующимся на бортах смоделированной структуры растяжения. На региональном уровне это крупные разломные зоны, такие как Приморская, Морская, Дельтовая, Бортовая и др. Этот

масштабный уровень соответствует отдельным разрывам на поверхности модели, в частности магистральному шву, входящему в состав внутренней структуры экспериментальных разломных зон.

В рельефе земной поверхности Байкальский рифт представлен грабеном, являющимся частью Байкальской рифтовой системы, располагающейся на Саяно-Байкальском поднятии [7]. Основные перемещения в результате рифтогенеза приурочены к центральной впадине, заполненной водами оз. Байкал, и плечам рифта, где формируются преимущественно сбросовые подвижки. Сбросовые зоны, слагающие плечи рифта, как правило, представлены в рельефе крупными уступами с различным падением относительно оси рифта. Так, зона Обручевского сброса, включающая Приморскую и Морскую межблоковые зоны, на СЗ фланге рифта и Черско-Баргузинская зона на ЮВ фланге имеют встречное направление падения и обрамляют впадину оз. Байкал, образуя грабен. Одноранговые с ними Прихребтовая и Джидо-Витимская зоны сонаправлены по падению на ЮВ и ограничивают Байкальскую зону по периферии. Стоит отметить, что отражению в природном рельефе Прихребтовой и Джидо-Витимской, по видимому, способствовал экзогенный фактор, поскольку в рельефе экспериментальной модели аналогичные зоны не выражены.

Анализ распределения градиента рельефа показал, что Байкальская межблоковая зона выделяется повышенными значениями параметра (рис. 3). Платформенная территория СЗ фланга рифта отражена существенно меньшими значениями градиента, такая же картина характерна для Центрально-Азиатского складчатого пояса на ЮВ фланге. Далее по направлению только южная часть исследуемого района представлена высокими значениями параметра, где проходит северная граница Монголо-Охотской

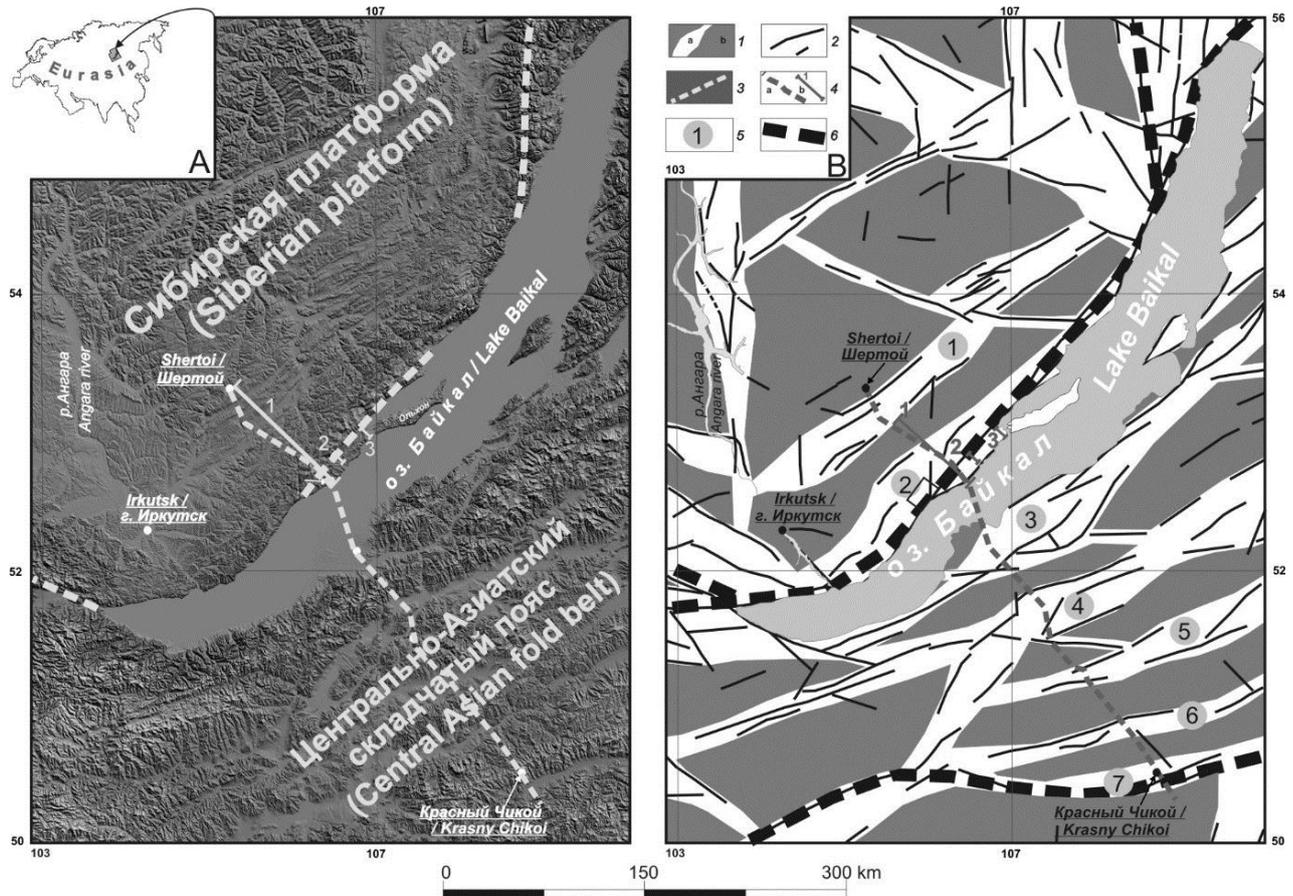


Рис. 2. Трехмерная модель рельефа (А) и построенная на ее основе схема зонно-блоковой структуры земной коры (В) Прибайкалья и Западного Забайкалья [2]:

- 1 – межблоковые зоны (а) и блоки (b); 2 – разломы, отчетливо выраженные линейными элементами рельефа; 3 – краевой шов Сибирской платформы; 4 – линии трансекта (а) и менее протяженных профилей (b) геолого-геофизических исследований, представленных в источнике [2]; 5 – межблоковые зоны: 1 – Предбайкальская, 2 – Обручевская, 3 – Черско-Баргузинская, 4 – Джида-Витимская, 5 – Тугнуй-Кондинская, 6 – Хилокская, 7 – Чикой-Ингодинская; 6 – границы крупных литосферных блоков

Fig. 2. 3D terrain model (A) and constructed on its basis diagram of the zone-block structure of the Earth's crust (B) of the Baikal region and the Western Transbaikal region [2]

- 1 – interblock zones (a) and blocks (b); 2 – faults sharply defined by relief lineaments; 3 – marginal suture of the Siberian platform; 4 – lines of transect (a) and less extensive profiles (b) of geological and geophysical studies presented in the source [2]; 5 – interblock zones: 1 – Cisbaikalian, 2 – Obruchevskaya, 3 – Chersko-Barguzinskaya, 4 – Dzhida-Vitimskaya, 5 – Tugnui-Kondinskaya, 6 – Khilokskaya, 7 – Chikoi-Ingodinskaya; 6 – boundaries of large lithospheric blocks

межблоковой зоны, сопоставимой по рангу с Байкальским рифтом. Таким образом, границы зон растяжения первого порядка наилучшим образом отражаются в поле градиента рельефа.

Распределение градиента в рамках Байкальской зоны неравномерно подобно эксперименту, с двумя участками повышенных значений (СЗ и ЮВ фланги

рифта), разделенных центральной впадиной растяжения (оз. Байкал), представленной минимальными значениями. Средние значения градиента одинаковы на флангах рифта, при этом участок исследований на СЗ фланге включает значительные платформенные территории в отличие от ЮВ плеча, что могло уменьшить величину среднего значения.

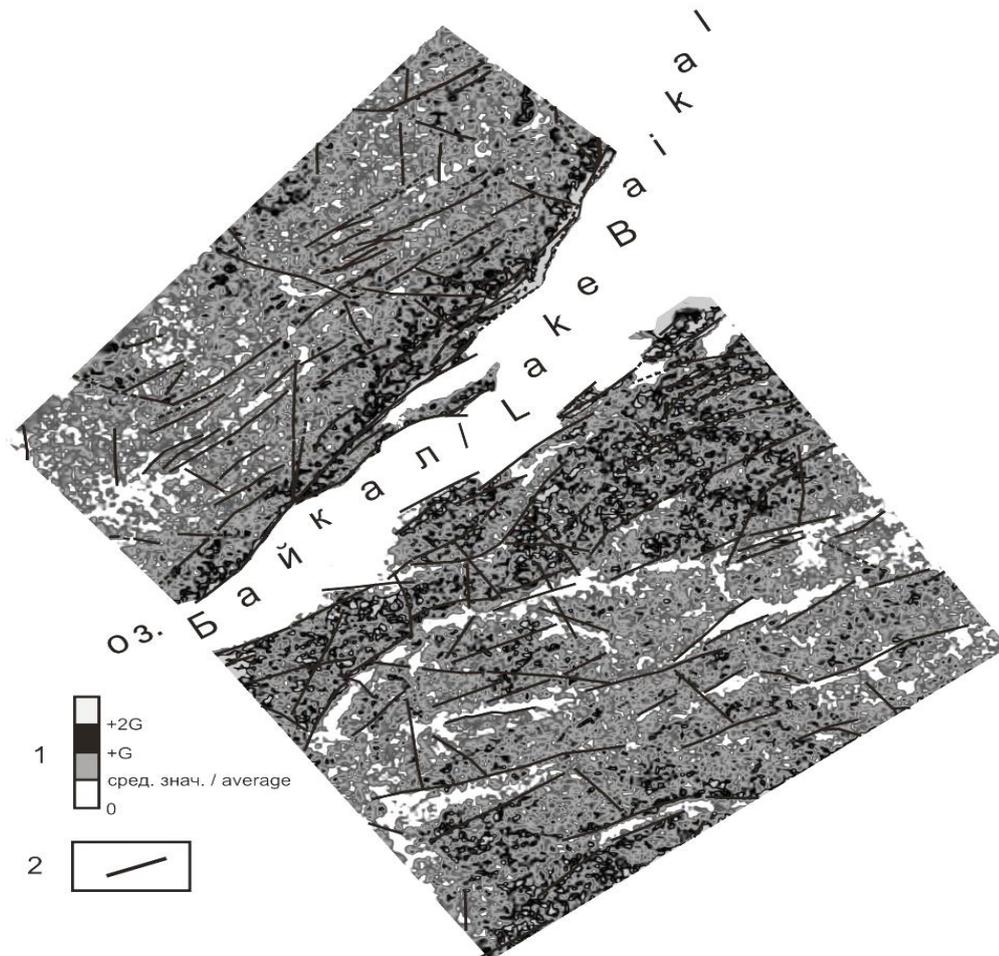


Рис. 3. Распределение градиента рельефа для СЗ и ЮВ флангов Байкальского рифта с разноранговыми линеаментами:
1 – шкала величин градиента рельефа (уровень среднего значения, стандартного и двух стандартных отклонений); 2 – крупные линеаменты
Fig. 3. Relief gradient distribution for the north-west and south-east flanks of the Baikal rift with different rank lineaments:
1 – scale of relief gradient values (level of the mean, standard and two standard deviations); 2 – large lineaments

В отличие от средних значений, максимальные значения параметра на СЗ фланге значительно превосходят таковые на ЮВ. Эти два фактора могут служить доказательством больших амплитуд вертикальных перемещений СЗ плеча рифта относительно ЮВ, что подобно экспериментальным данным, где на подвижном и неподвижном штампе установки «Разлом» формировались зоны с различной интенсивностью вертикальных смещений. В природной обстановке неподвижному штампу будет соот-

ветствовать СЗ плечо рифта, а подвижному – ЮВ плечо, что в свою очередь не противоречит современным данным определений GPS-геодезии [10, 11]. При общем перемещении Сибирской и Амурской плит на ЮВ последняя движется несколько быстрее, тем самым образуя структуру растяжения.

Каждый участок повышенных значений градиента, исходя из эксперимента, должен отражать крупные сбросовые системы второго и большего порядков с различным падением относительно

центральной впадины. Однако, как видно из рис. 3, выделить зоны низших рангов в распределении градиента рельефа весьма проблематично. Поэтому сначала было решено детально проанализировать график градиента по профилю проведенных ранее [11] геолого-геофизических исследований на ЮВ фланге Байкальского рифта, сопоставив его с границами выделенных в рамках исследований межблоковых зон.

Анализ графиков по профилю геолого-геофизических исследований. Было построено несколько графиков градиента рельефа по профилю, которые отличались шагом между точками измерения, это позволило проанализировать различные варианты проявления межблоковых зон в поле параметра, а также скорректировать методику построения карт его распределений в изолиниях. На графиках видно (рис. 4, В, С), что значения градиента выше среднего уровня, использованные при анализе экспериментальных материалов (см. рис. 1), в данном случае хуже выделяют границы зон. Уровень средних значений параметра часто объединяет области, принадлежащие не только межблоковым зонам, но и относительно ненарушенным (блоки) сопредельным территориям. Существенно эффективней дизъюнктивные зоны отражаются на графике градиента по уровню значений выше стандартного отклонения, что характерно для зон как высокого, так и более низкого рангов. С уменьшением шага между точками измерения по профилю с 1500 до 500 м эта зависимость проявляется еще сильнее, что особенно заметно на уровне зон низкого ранга. Полученный результат необходимо учитывать в дальнейших исследованиях с использованием градиентного анализа рельефа. При изначальном заложении профилей с шагом 500 м можно достаточно легко построить распределения параметра как через 500, так и через 1500 м.

Зоны высших рангов отражаются на графиках при объединении отдельных пиков аномальных значений (выше стандартного отклонения) градиента рельефа. Главным критерием объединения служит ширина аномальных пиков на графиках, которая должна превосходить расстояние между ними (см. рис. 4, В, С); в противном случае объединять аномалии не следует. Полученные таким способом новые аномалии следует отождествлять с дизъюнктивными зонами высшего ранга. Дальнейшее объединение по такому же принципу полученных аномалий позволяет отразить иерархию межблоковых зон различного ранга.

В целом характер графиков подтверждает эффективность описанного выше способа выделения Байкальской межблоковой зоны максимальными значениями градиента рельефа. За границами Байкальской зоны значения параметра на графиках резко уменьшаются с постепенным их увеличением по мере приближения к Монголо-Охотской межблоковой зоне. Если детально рассмотреть графики в рамках Байкальской зоны, можно выделить ряд характерных особенностей.

Так, на уровне межблоковых зон второго порядка (особенно при шаге 500 м между точками измерений) не выделяется блок (см. рис. 4, В, С), разделяющий Черско-Баргузинскую и Джида-Витимскую зоны. Возможно, это связано с местом прохождения профиля геолого-геофизических исследований, на котором эти две зоны проходят максимально близко друг от друга или даже могут частично перекрываться. Об этом свидетельствуют расчеты, произведенные по формуле С.И. Шермана с соавторами [17], отражающей зависимость длины разломной зоны от ее ширины. Так, при минимальной и примерно одинаковой длине каждой из двух зон (даже в пределах Байкальской впадины) около 600 км их ширина будет равна примерно 18 км,

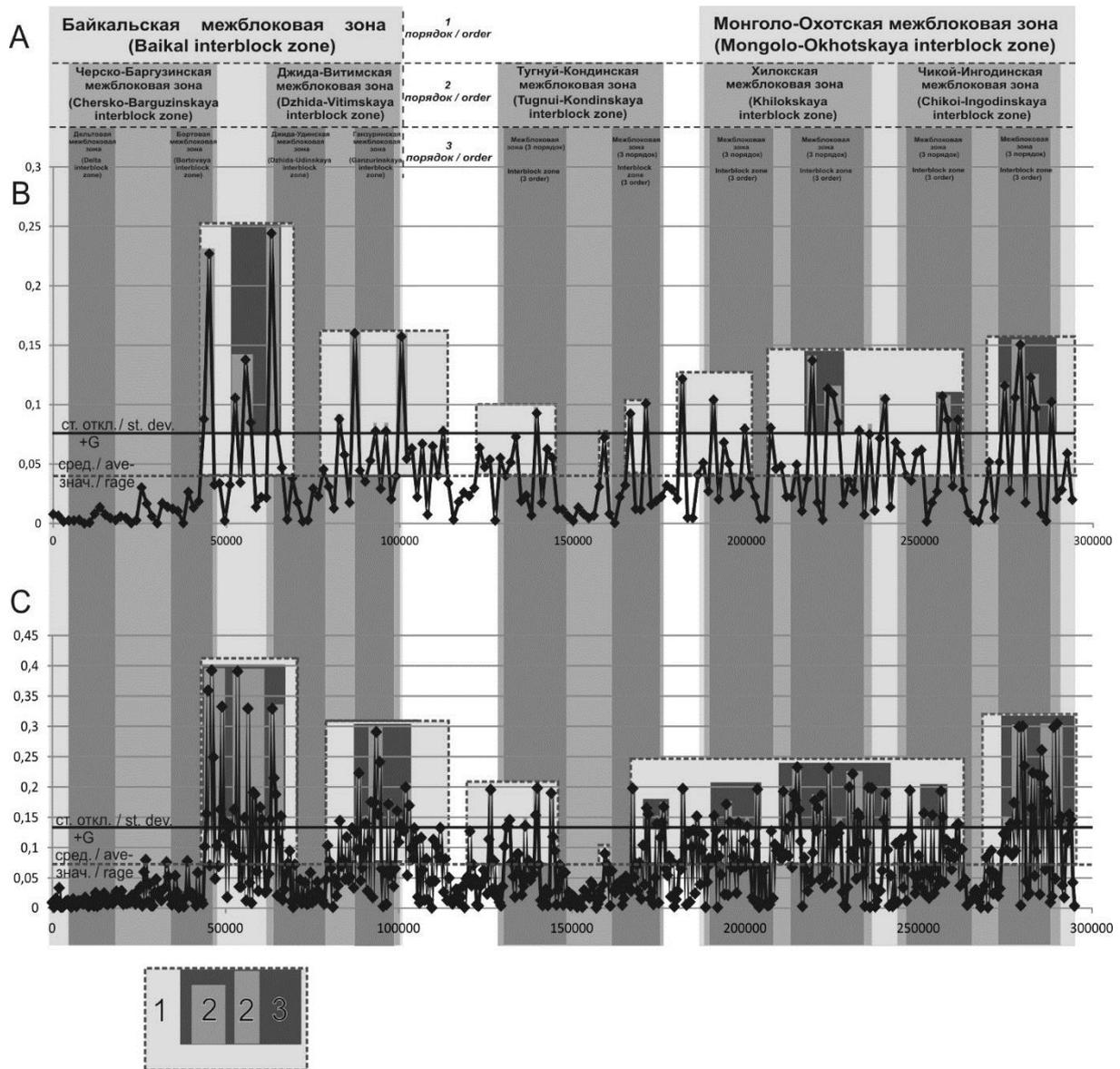


Рис. 4. Сопоставление выделенных ранее границ межблоковых зон с градиентом рельефа по профилю на ЮВ фланге Байкальского рифта:
 А – иерархия и границы разноранговых межблоковых зон, выделенных комплексными геолого-геофизическими исследованиями [2]; В – график градиента рельефа по профилю геолого-геофизических исследований с шагом между точками измерения 1500 м; С – график градиента рельефа по профилю геолого-геофизических исследований с шагом между точками измерения 500 м
 1, 2 – аномалии на графиках градиента рельефа, выделенные по уровню выше среднего значения (1) и стандартного отклонения (2); 3 – генерализованные аномалии выше уровня стандартного отклонения

Fig. 4. Comparison of previously identified boundaries of the interblock zones with a relief gradient along the profile on the south-east flank of the Baikal rift:
 А – hierarchy and boundaries of different rank interblock zones identified by integrated geological and geophysical studies [2]; В – graph of the relief gradient along the geological and geophysical survey profile with a 1500m step between measurement points; С – graph of the relief gradient along the geological and geophysical survey profile with a 500 m step between measurement points
 1, 2 – anomalies on relief gradient graphs distinguished by the level above the mean (1) and standard deviation (2); 3 – generalized anomalies above the standard deviation level

тогда как общее расстояние по профилю исследований между уступами в рельефе, отражающими магистральные швы данных деструктивных зон, – 35–38 км. Еще одной особенностью графика градиента в пределах Байкальской зоны является то, что максимумами параметра на уровне третьего порядка не выделяется Дельтовая разломная зона. По-видимому, это следует объяснять прохождением профиля через Усть-Селенгинскую впадину: на северо-востоке от нее, как следует из карты распределения гради-

ента рельефа в плане (рис. 5), Дельтовая зона отчетливо отражается максимумами параметра.

В целом можно заключить, что природные межблоковые зоны отражаются в виде сгущений участков аномальных значений градиента рельефа, превышающих уровень стандартного отклонения, в отличие от эксперимента, где подобным уровнем являются средние значения. В соответствии с полученным результатом была скорректирована методика построения и предварительного анализа карт

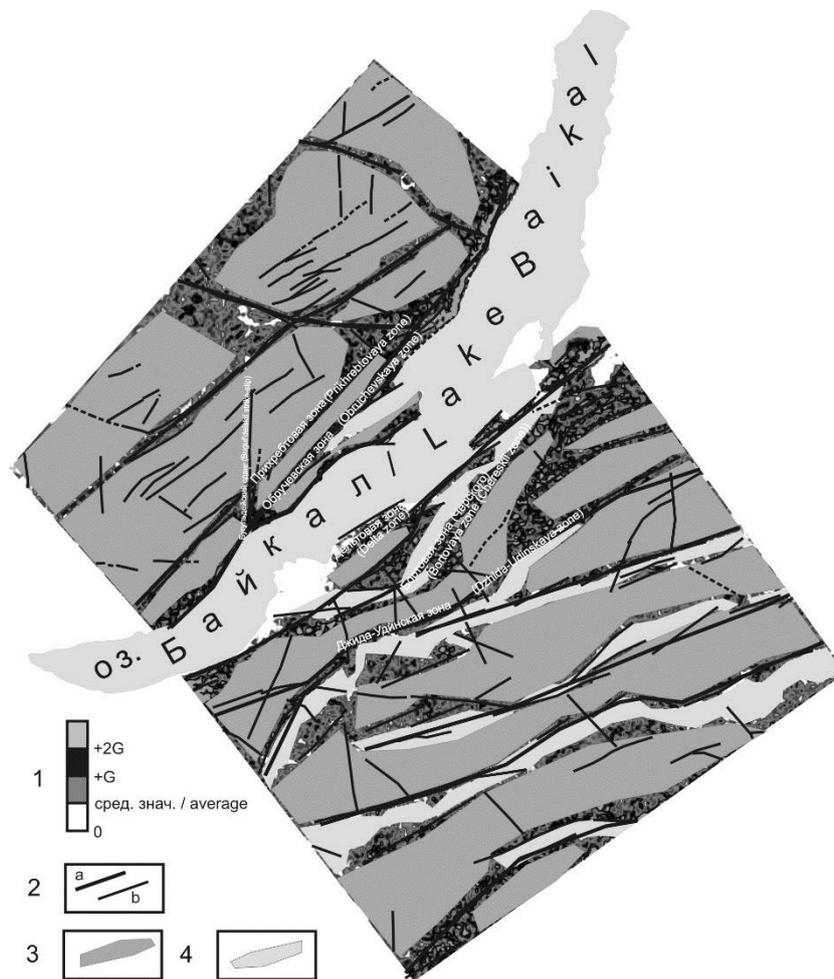


Рис. 5. Схема разломно-блокового строения центральной части Байкальского рифта, построенная на основе анализа градиента рельефа:

1 – шкала величин градиента рельефа (уровень среднего значения, стандартного и двух стандартных отклонений); 2 – протяженные (а) и крупные (b) линеаменты; 3 – блоки; 4 – впадины растяжения

Fig. 5. Diagram of the fault-block structure of the central part of the Baikal rift built on the basis of the relief gradient analysis:

1 – scale of relief gradient values (level of the mean, standard and two standard deviations); 2 – extended (a) and large (b) lineaments; 3 – blocks; 4 – tensional basins

распределений градиента рельефа в плане для изучаемой территории Байкальского рифта.

Корректировка методики. Техническое построение распределений градиента не изменилось за исключением первоначального выбора шага между точками измерений в рамках каждого профиля. Исходя из анализа графиков, рекомендуемый шаг между пикетами – 0,33–1,0 расстояния между двумя соседними профилями, что позволит отразить в дальнейшем в поле градиента основные разноранговые зоны. Карта градиента рельефа дополняется линеаменами, иерархически сгруппированными до нескольких высших рангов.

При структурном анализе карты градиента рельефа удобней начинать с выделения относительно ненарушенных территорий, т. е. блоков (см. рис. 5). Для этого в распределении градиента рельефа выбираются участки, на которых значения параметра преимущественно ниже уровня стандартного отклонения. Допускаются локальные максимумы аномальных значений внутри пространства блока. На начальном этапе к таким участкам не относятся территории с минимальными – не достигающими среднего уровня – значениями градиента, поскольку они могут отражать не только блоки, но и центральные впадины растяжения, перекрытые осадками. Границы блоков не должны пересекать крупные линеаменты. Участок с минимальными значениями исследуемого параметра отождествляется с впадиной растяжения, если аналогично эксперименту он линейно вытянут и примыкает к области повышенных значений градиента и линеаменту (а лучше к нескольким линеаментам с двух разных сторон данного участка) высшего ранга. При несоблюдении одного или нескольких критериев такой участок отождествляется с блоком. На последнем этапе отрисованные блоки группируются, не пересекая линеаментов

первого порядка (протяженные линеаменты). Выделенные таким образом оставшиеся участки на карте градиента рельефа отождествляются с межблоковыми зонами различного порядка, а также узлам их сочленения. В распределении градиента рельефа они отражаются аномальными значениями параметра (выше уровня стандартного отклонения).

Анализ итоговой карты территории Байкальского рифта. Карта, полученная при анализе рельефа территории Байкальского рифта (см. рис. 5), не противоречит предыдущим выводам, касающимся выделенных границ межблоковых зон различного ранга и полученным при проведении геолого-геофизических полевых работ [2]. Детальный анализ двух флангов Байкальской межблоковой зоны позволил установить ряд специфических особенностей отражения внутренней структуры дизъюнктивных зон более низкого ранга по отношению к ней в поле градиента рельефа. Распределение градиента неравномерно на каждом фланге Байкальского рифта в поперечном и продольном направлениях. Неравномерность отражается в изменении величины градиента в обоих направлениях и связана с разрывными структурами различного ранга. На СЗ фланге в структуре Байкальской межблоковой зоны выделяют Обручевскую межблоковую зону, на ЮВ фланге – Черско-Баргузинскую и Джида-Витимскую зоны (см. рис. 2, 5).

На СЗ фланге максимальные значения градиента рельефа в пределах Обручевской межблоковой зоны смещены к одной из ее границ, что отражает положение Приморской и Морской зон третьего порядка. Вытянутые цепочки максимальных значений исследуемого параметра в пределах вышеуказанных зон, исходя из эксперимента, должны отражать положение магистральных сместителей. По мере удаления от магистрального сместителя разломной зоны значения

градиента уменьшаются. Менее отчетливо в поле градиента отражается Прихребтовая межблоковая зона третьего порядка, четко проявленная только в центральной части рифта. Более мелкие или локальные максимумы, как правило, приурочены к узлам сочленения межблоковых зон или зонам сдвигового типа, являющимся структурами второго порядка по отношению к рифту. Так, крупный узел сочленения сразу трех зон (Приморская, Прихребтовая и зона, подходящая к ним под острым углом), отраженный сгущением аномальных значений градиента, расположен на СВ исследуемого участка, недалеко от северной оконечности острова Ольхон (см. рис. 5). Менее масштабно выглядит узел сочленения Приморской, Морской и зоны сдвига по реке Бугульдейка на ЮЗ исследуемого участка. Подобно эксперименту, в распределении градиента рельефа межблоковых зон низкого ранга можно проследить смещение или прерывистость отдельных максимумов, что, как правило, отражает положение сдвиговых зон, перпендикулярных оси растяжения Байкальской впадины. В целом в отличие от эксперимента в природных условиях сдвиговые зоны лучше отражаются в рельефе, что связано с деятельностью рек. Следует отметить, что на СЗ плече рифта описанным способом не выделились имеющиеся в его структуре впадины, в частности Бугульдейско-Чернорудский грабен. По-видимому, эти морфоструктуры имеют небольшую ширину, и для их отражения в поле градиента необходимо провести более детальные построения.

Анализ ЮВ фланга Байкальского рифта (см. рис. 5) показал, что основные закономерности проявления разноранговых межблоковых зон в градиенте рельефа, выделенные для СЗ фланга, имеют место и здесь. В отличие от СЗ фланга на ЮВ фланге к трансрегиональному уровню (второй порядок) относится не одна, а две межблоковые зоны: Черско-

Баргузинская и Джиды-Витимская. Образование двух одноранговых зон на борту рифта не характерно для экспериментальной обстановки. Важной особенностью является наклон Джиды-Удинской сбросовой зоны в противоположную сторону относительно главной впадины растяжения (оз. Байкал). Формирование подобного типа разрывов в эксперименте было описано выше. Главной особенностью этих разрывов является меньшая амплитуда вертикального перемещения и, как следствие, отражение меньшими величинами в поле градиента рельефа по сравнению с разрывами, имеющими падение в сторону центральной межблоковой впадины. Подобно экспериментальным данным, в поле градиента рельефа Джиды-Удинская сбросовая зона выделяется понижением величин аномальных значений параметра в сравнении с Бортовой сбросовой зоной, наклоненной в сторону оз. Байкал (см. рис. 5). В отличие от СЗ плеча рифта здесь отчетливо выделяются впадины растяжения в распределении градиента рельефа. Они имеют тектоническое происхождение, что доказывается данными полевых исследований [2].

Таким образом, различие в породном составе, неодинаковые скорости перемещений, а также воздействие экзогенных процессов существенно осложняют характерные проявления в рельефе внутренней структуры зоны растяжения Байкальского рифта. Тем не менее природная ситуация на разных масштабных уровнях во многих основных чертах сохраняет главные закономерности, установленные при изучении экспериментальных моделей.

Выводы

Использованная и дополненная в ходе исследования методика физического моделирования межблоковой зоны растяжения с последующим сравнением экспериментальных моделей и природных аналогов разного масштабного

уровня позволила изучить как наиболее общие, так и некоторые частные закономерности проявления внутренней структуры межблоковых зон в рельефе.

Показано, что в экспериментальных моделях межблоковая зона выделяется двумя участками аномальных величин градиента вертикальных движений с участком значений параметра ниже среднего уровня между ними. Каждому участку аномальных значений параметра соответствует сбросовая разломная зона. Интенсивность вертикальных перемещений у сбросовых зон неодинакова и зависит от относительной скорости перемещения блоков, в которых они расположены, что отражается в величинах градиента. Распределение градиента вертикальных движений неоднородно в пределах каждой зоны растяжения различного ранга, что является следствием неравномерного формирования их внутренней структуры в поперечном и продольном направлениях. В поперечном направлении неравномерность связана с магистральным сместителем зоны, а также с опережающими его развитие крупными сбросовыми разрывами. Направление падения опережающих сбросовых разрывов в зоне разлома может отличаться до противоположного, что отражается разницей в значениях градиента. У разрывов, падающих в сторону магистрального сместителя (R-тип), значения выше, чем у разрывов, падающих в противоположную сторону (R'-тип). В продольном направлении неравномерность распределения градиента связана со сдвиговыми перемещениями, которые не выделяются отдельными максимумами параметра, но смещают участки максимальных значений, приуроченные к маги-

стральному сместителю.

Выделенные закономерности в целом справедливы для природных зон растяжения, изученных в пределах Байкальского рифта. Важной отличительной особенностью природной структурной ситуации от эксперимента является отражение межблоковых зон в поле градиента рельефа значениями выше уровня стандартного отклонения, а не средними значениями. Внутренняя структура природной зоны растяжения высшего ранга может быть представлена несколькими подзонами второго порядка в отличие от эксперимента, где происходит формирование преимущественно по одной подзоне на каждом борту впадины растяжения. При существенном влиянии на рельеф экзогенного фактора природные сдвиговые зоны, являющиеся структурами второго порядка, отражаются в распределении градиента лучше, чем отождествляемые с ними разрывы в эксперименте.

В целом предложенная методика анализа внутреннего строения разноранговых зон растяжения показала свою эффективность при исследовании территории Байкальского рифта, а полученные в ходе ее применения результаты не противоречат предыдущим выводам [2]. Часть методики, касающаяся анализа природных зон растяжения, может быть использована в качестве основополагающей в комплексе геолого-геофизических исследований разломно-блокового строения участков земной коры.

Некоторые виды работ выполнены при поддержке грантов РФФИ № 16-35-00141, № 16-05-00154 и № 16-35-00349.

Библиографический список

1. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новоси-

бирск: Гео, 2003. 244 с.

2. Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В., Поспеева Е.В., Боб-

ров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Потапов В.В., Зарипов Р.М., Черемных А.С. Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной Сибири: тектонофизическая интерпретация геолого-геофизических данных // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 3. С. 203–278.

3. Ламакин В.В. Неотектоника Байкальской впадины. М.: Наука, 1968. 247 с.

4. Леви К.Г. Вертикальные движения земной коры в Байкальской рифтовой зоне // Проблемы разломной тектоники / отв. ред. Н.А. Логачев, С.И. Шерман. Новосибирск: Наука, 1981. С. 142–167.

5. Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / отв. ред. К.Г. Леви, С.И. Шерман [и др.]. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 294 с.

6. Леви К.Г., Шерман С.И., Плюшина Л.В. Карта неотектоники Прибайкалья и Забайкалья. Масштаб 1:2500000 / под ред. Н.А. Логачева. Иркутск, 1982.

7. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 5. С. 391–406.

8. Логачев Н.А. Флоренсов Н.А. Байкальская система рифтовых долин // Роль рифтогенеза в геологической истории Земли / отв. ред. Н.А. Флоренсов. Новосибирск: Наука, 1977. С. 19–30.

9. Лунина О.В., Гладков А.С., Шерстянкин П.П. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири // Доклады Академии Наук. 2010. Т. 433. № 5. С. 662–667.

10. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В. Тектонические деформации Монголо-Байкальского региона по данным GPS-геодезии // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2006. Т. 3. № 2. С. 42–51.

11. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Саньков А.В., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Кале Э. Современные деформации земной коры в области сочленения сегментов рифтов центральной части

Байкальской рифтовой системы по данным GPS-геодезии // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 11. С. 1814–1825.

12. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Гео, 2001. 252 с.

13. Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 258 с.

14. Шерман С.И., Леви К.Г., Ружич В.В., Саньков В.А., Днепровский Ю.И., Рассказов С.В. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника. Новосибирск: Наука, 1984. 208 с.

15. Некрасов А.И. Тектонофизический подход к анализу дислокаций для оценки напряженно-деформированного состояния объекта в условиях закрытой территории // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: тезисы докладов Всероссийского совещания с участием приглашенных исследователей из других стран (г. Иркутск, 11–16 августа 2014 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2014. С. 30.

16. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В., Тугарина М.А. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект. Новосибирск: Гео, 2005. 293 с.

17. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.

18. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. [и др.]. Разломообразование в литосфере: зоны растяжения. Новосибирск: Наука, 1992. 228 с.

19. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Черемных А.В. Деструктивные зоны и разломно-блоковые структуры Центральной Азии // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18. № 2. С. 41–53.

20. ASTER GDEM is a product of

METI and NASA [Электронный ресурс]. URL: <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/index.html> (дата обращения 27.09.2017).

21. Леви К.Г. Применение количественных методов в геоморфологии. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1995. 54 с.

22. Черемных А.С. Сдвиговая разломная зона в рельефе: анализ цифро-

вых моделей экспериментальных и природных объектов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 2 (85). С. 92–103.

23. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice // Journal of Structural Geology. 1985. Vol. 7. № 3/4. P. 437–457.

References

1. Seminskii K.Zh. *Vnutrennyaya struktura kontinental'nykh razlomnykh zon. Tekto-nofizicheskii aspekt* [Internal structure of continental fault zones. Tectonophysical aspect]. Novosibirsk: Geo Publ., 2003, 244 p. (In Russian).

2. Seminskii K.Zh., Kozhevnikov N.O., Cheremnykh A.V., Pospieva E.V., Bobrov A.A., Olenchenko V.V., Tugarina M.A., Potapov V.V., Zaripov R.M., Cheremnykh A.S. Interblock zones in the crust of the southern regions of East Siberia: tectonophysical interpretation of geological and geophysical data. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 2013, vol. 4, no. 3. pp. 203–278. (In Russian).

3. Lamakin V.V. *Neotektonika Baikalskoi vpadiny* [Neotectonics of the Baikal basin]. Moscow: Nauka Publ., 1968, 247 p. (In Russian).

4. Levi K.G. Vertical movements of the earth crust in the Baikal rift zone. *Problemy razlomnoi tektoniki* [Problems of fault tectonics]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1981, pp. 142–167. (In Russian).

5. Levi K.G., Sherman S.I. *Aktual'nye voprosy sovremennoi geodinamiki Tsentral'noi Azii* [Topical issues of modern geodynamics of Central Asia]. Novosibirsk: Siberian branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2005, 294 p. (In Russian).

6. Levi K.G., Sherman S.I., Plyusnina L.V. *Karta neotektoniki Pribaikal'ya i Zabaikal'ya. Masshtab 1:2500000* [Map of Baikal and Transbaikal area neotectonics.

Scale 1:2500000]. Irkutsk, 1982. (In Russian).

7. Logachev N.A. History and geodynamics of the Baikal rift. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2003, vol. 44, no. 5, pp. 391–406. (In Russian).

8. Logachev N.A. Florensov N.A. Baikal system of rift valleys. *Rol' riftogeneza v geologicheskoi istorii Zemli* [The role of rifting in geological history of the Earth]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1977, pp. 19–30. (In Russian).

9. Lunina O.V., Gladkov A.S., Sherstyankin P.P. A new electronic map of active faults for southeastern Siberia. *Doklady Akademii Nauk* [Doklady Earth Sciences], 2010, vol. 433, no. 5, pp. 662–667. (In Russian).

10. Likhnev A.V., San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V. Tectonic deformations of the Mongolian-Baikar region according to GPS geodesy data. *Interesko Geo-Sibir'* [Interesko Geo-Siberia], 2006, vol. 3, no. 2, pp. 42–51. (In Russian).

11. Likhnev A.V., San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., Byzov L.M., San'kov A.V., Bashkuev Yu.B., Dembelov M.G., Kale E. GPS-measurements of recent crustal deformation in the junction zone of the rift segments in the central Baikal rift system. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2013, vol. 54, no. 11, pp. 1814–1825. (In Russian).

12. Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandel'baum M.M., Alakshin A.M., Pospeev A.V., Shimaraev M.N., Khlystov O.M. *Kainozoi Baikalskoi riftovoi vpadiny: stroenie i geologicheskaya istoriya* [Cenozoic of the Baikal rift basin: structure and geological history]. Novosibirsk: Geo Publ., 2001, 252 p. (In Russian).

13. Florensov N.A. *Mezozoiskie i kainozoiskie vpadiny Pribaikal'ya* [Mesozoic and Cenozoic basins of the Baikal region]. Moscow – Leningrad: USSR Academy of Sciences Publ., 1960, 258 p. (In Russian).

14. Sherman S.I., Levi K.G., Ruzhich V.V., San'kov V.A., Dneprovskii Yu.I., Ras-skazov S.V. *Geologiya i seismichnost' zony BAM. Neotektonika* [Geology and seismic activity of the BAM zone. Neotectonics]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984, 208 p. (In Russian).

15. Nekrasov A.I. *Tektonofizicheskiy podkhod k analizu dislokatsii dlya otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ob'ekta v usloviyakh zakrytoi territorii* [Tectonophysical approach to the dislocation analysis for object stress-strain state assessment in a closed area]. *Tezisy dokladov Vserossiiskogo soveshchaniya s uchastiem priglashennykh issledovatelei iz drugih stran "Razlomoobrazovanie v litosfere i soputstvuyushchie protsessy: tektonofizicheskii analiz"* [Abstracts of the All-Russia conference with the participation of invited foreign researchers "Faulting in lithosphere and associated processes: tectonophysical analysis"]. Irkutsk, 11–16 August 2014. Irkutsk: Institute of the Earth's crust SB RAS Publ., 2014, pp. 30. (In Russian).

16. Seminskii K.Zh., Gladkov A.S., Lunina O.V., Tugarina M.A. *Vnutrennyaya struktura kontinental'nykh razlomnykh zon.*

Prikladnoi aspekt [Internal structure of continental fault zones. Applied aspect]. Novosibirsk: Geo Publ., 2005, 293 pp. (In Russian).

17. Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu. *Oblasti dinamicheskogo vliyaniya raz-lomov (rezul'taty modelirovaniya)* [Areas of dynamic fault influence]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1983, 112 p. (In Russian).

18. Sherman S.I., Seminskii K.Zh., Bornyakov S.A. *Razlomoobrazovanie v litosfere: zony rastyazheniya* [Faulting in lithosphere: extension zones]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1992, 228 p. (In Russian).

19. Sherman S.I., Seminskii K.Zh. Destruction zones and fault-block structures of Central Asia. *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 1999, vol. 18, no. 2, pp. 41–53. (In Russian).

20. ASTER GDEM is a product of METI and NASA. Available at: <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/index.html> (accessed 27 September 2017).

21. Levi K.G. *Primenenie kolichestvennykh metodov v geomorfologii* [Application of quantitative methods in geomorphology]. Irkutsk: Irkutsk State University Publ., 1995, 54 p. (In Russian).

22. Cheremnykh A.S. Strike-slip fault zone in relief: analysis of experimental and natural objects numerical models. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 2 (85), pp. 92–103. (In Russian).

23. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice. *Journal of Structural Geology*, 1985, vol. 7, no. 3/4, pp. 437–457.

Критерии авторства

Черемных А.С., Каримова А.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Cheremnykh A.S., Karimova A.A. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.