

*На правах рукописи*



**Бызов Леонид Михайлович**

**ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ГОРНОГО  
ОБРАМЛЕНИЯ ВПАДИН БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ ПО ДАННЫМ  
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Специальность 25.00.03 – геотектоника и геодинамика**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук**

**ИРКУТСК 2022**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН).

**Научный руководитель:**

**Саньков Владимир Анатольевич**, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией современной геодинамики ИЗК СО РАН

**Официальные оппоненты:**

**Флоринский Игорь Васильевич**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник (ФГБУН Институт математических проблем биологии РАН – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, г. Пущино)

**Кононов Евгений Ефимович**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник (ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

Защита состоится «12» сентября 2022 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д.003.022.03 при Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН ИЗК СО РАН и на сайте: <http://www.crust.irk.ru/images/upload/newsfull215/3194.pdf>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять учёному секретарю совета, кандидату физико-математических наук Добрыниной Анне Александровне по вышеуказанному адресу или e-mail: [dobrynina@crust.irk.ru](mailto:dobrynina@crust.irk.ru). Тел: 8(3952)426900.

Автореферат разослан «20» мая 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 003.022.03  
кандидат физико-математических наук

А.А. Добрынина

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Объект и предмет исследования**

В качестве объекта исследования в работе выступали приразломные структуры горного обрамления впадин Байкальской рифтовой системы. Основным предметом исследования являлась скорость тектонического поднятия данных структур на позднекайнозойском этапе развития БРС.

### **Актуальность темы исследования**

Определение количественных параметров вертикальных тектонических движения является важной научной задачей, решение которой играет ключевую роль в прогнозировании геологических процессов, в том числе, представляющих опасность для жизнедеятельности человека. При этом для Байкальской рифтовой системы, проблема оценки скорости поднятия плеч рифта остается нерешенной, что связано с техническими и интерпретационными особенностями существующих методик исследования. Новый инструментальный подход, предложенный в настоящей работе, с точки зрения автора, может внести вклад в изучение байкальского орогенеза и быть актуальным для реализации прикладных задач.

### **Цель работы**

Определение количественных параметров тектонического поднятия горного обрамления впадин БРС с помощью адаптированной методики, включающей морфотектонический анализ и численное моделирование.

### **Основные задачи исследований**

1. Разработка общей концепции исследования;
2. Морфотектонический анализ рельефа горного обрамления впадин БРС на предмет выявления структур, которые можно рассматривать в роли индикаторов позднекайнозойского поднятия плеч рифта;
3. Адаптация программы комплексного математического моделирования CHILD [Tucker, 2010] к решению задач исследования;
4. Численная реконструкция позднекайнозойской эволюции рельефа отдельных сегментов горного обрамления и определение аппроксимированных значения скорости тектонического поднятия для этих объектов;
5. Сравнительный морфотектонический анализ, направленный на экстраполяцию результатов моделирования и определение возможных значений скорости поднятия плеч рифтовых впадин для всей системы.

### **Методы исследования и фактический материал**

В основе исследования лежит комплексный инструментальный подход, включающий морфотектонический анализ горного обрамления впадин БРС, выполненный с помощью ГИС и методику численного моделирования CHILD, разработанную профессором Университета Колорадо (Боулдер, США) Грегори Такером [Tucker, 2010]. Важную роль в работе сыграли данные трекового датирования по апатитам [Jolivet et al., 2009].

### **Личный вклад автора**

В ходе работы над диссертацией автором, на основе существующих методик, был разработан новый подход к количественному анализу процессов орогенеза, характерных для горного обрамления впадин БРС.. Внесение технических изменений в программу CHILD были выполнены специалистами ИДСТУ СО РАН, но при участии автора. Дальнейшее тестирование программы и экспериментальная часть работы проводились автором лично. Также автор принимал непосредственное участие в отборе и подготовке проб для трекового датирования, по результатам которого были получены эталонные значения скорости поднятия.

### **Научная новизна исследования**

Был разработан новый инструментальный подход к количественному анализу позднекайнозойского развития горного обрамления впадин Байкальской рифтовой системы. Впервые было выполнено трехмерное компьютерное моделирование позднекайнозойского

развития присбросовых блоковых структур БРС с учетом широкого спектра рельефообразующих факторов и достоверного отображения кинематики разлома. Были вычислены новые значения возможной скорости поднятия этих структур для различных орографических элементов БРС.

#### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость работы заключается в разработке нового инструментального подхода к количественному анализу развития рельефа горного обрамления рифтовых впадин и оценке скорости тектонического поднятия плеч рифта на позднекайнозойском этапе.

Практическую значимость работы заключается в определении аппроксимированных значений позднекайнозойского поднятия структур горного обрамления БРС, которые могут быть использованы при проведении сейсмогеодинамического районирования и выявлении зон опасных природных процессов на различных пространственных уровнях.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Степень достоверности материалов исследования обеспечивается проведением множества однотипных экспериментов с привлечением объектов, расположенных в различных частях Байкальского рифта

По результатам исследования, связанным с темой диссертации, лично и в соавторстве, было опубликовано 7 работ в журналах, входящих в список ВАК и 10 - в сборниках материалов конференций.

Результаты исследования, связанные с темой диссертации, докладывались на российских и международных конференциях: XLI Тектоническое совещание (Москва, 2008), Всероссийский научный симпозиум, посвященный памяти Н.А. Логачева " Кайнозойский континентальный рифтогенез" (Иркутск, 2010), Всероссийская конференция с участием иностранных учёных "Процессы самоорганизации в эрозионно-русловых системах и динамике речных долин "Fluvial systems-2012" (Томск, 2012), Второй Всероссийский симпозиум с международным участием и молодежная научная школа, посвященные памяти академиков Н.А. Логачева и Е.Е. Милановского " Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы" (Иркутск, 2013), Генеральная ассамблея Европейского Геофизического общества (Вена, Австрия, 2014), III Всероссийское совещание и II Всероссийская молодежная школа по современной геодинамике " Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе" (Иркутск, 2016), IV Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике (Горячинск, 2017), XII Российско-монгольская международная конференция " Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона: результаты многолетних исследований и научно-образовательная политика" (Иркутск, 2018), IV Всероссийский симпозиум с участием иностранных ученых, посвященный 90-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева " Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы" (Иркутск, 2019), Всероссийское совещание с участием приглашенных исследователей из других стран, посвященное памяти профессора С.И. Шермана "Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ" (Иркутск, 2021).

#### **Основные защищаемые положения**

1. По результатам морфотектонического анализа в рельефе горного обрамления впадин Байкальской рифтовой системы выделен характерный тип присбросовых склонов, особенности морфологии которых позволяют рассматривать данные формы рельефа в качестве морфометрических индикаторов позднекайнозойского поднятия плеч рифта.

2. Предложенный комплексный подход, основанный на методах морфотектонического анализа и численного моделирования, позволяет реконструировать позднекайнозойское развитие горного обрамления впадин БРС с учетом широкого спектра взаимосвязанных эндогенных и экзогенных рельефообразующих процессов.

3. По результатам численного моделирования показано, что скорости позднекайнозойского поднятия горного обрамления впадин БРС варьируют в диапазоне аппроксимированных значений 0.3-0.5 мм/год, при этом скорости поднятий северных и

северо-западных бортов рифтовых впадин превышают значения, характерные для южных и юго-восточных плеч рифта. Устойчивая корреляционная зависимость между модельными параметрами поднятия и морфометрическими показателями рельефа эскарпментов, позволяет экстраполировать параметры модели на объекты, характеризующиеся схожими морфометрическими свойствами и оценить скорости вертикальных движений по разломам региона.

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю к.г.-м.н. В.А. Санькову, профессору Университета Колорадо Грегори Такеру (G. Tucker), сотрудникам ИДСТУ СО РАН М.Ю. Кензину и к.т.н. С.А. Ульянову, к.г.-м.н. А.И. Мирошниченко, д.г.-н. Ю.В. Рыжову, к.г.-м.н. С.Г. Аржанникову, профессору Университета Ниццы Кароль Пети (C. Petit), профессору Университета Ренна Марку Жоливе (M. Jolivet), доктору геологии Микаэлю Аттало (M. Attal), доктору геологии Джину Брауну (J. Braun), коллегам по лаборатории современной геодинамики ИЗК СО РАН, а также безвременно ушедшему д.г.-м.н, профессору К.Г. Леви.

## **ГЛАВА 1. СТРОЕНИЕ И ДИНАМИКА ПРИРАЗЛОМНЫХ БЛОКОВЫХ СТРУКТУР ГОРНОГО ОБРАМЛЕНИЯ ВПАДИН БРС**

### **1.1. Общая характеристика строения и геодинамики БРС**

Байкальская рифтовая система представляет собой разветвленную цепь тектонических впадин, ограниченных разломами преимущественно сбросовой и сбросо-сдвиговой кинематики, в обрамлении горных сооружений различной морфологии и морфометрии. Несмотря на высокий уровень геологической изученности объекта, вопрос о причинах и механизмах его формирования остается дискуссионным. Концепции, объясняющие феномен байкальского рифтогенеза, традиционно делят на три группы, принципиальное различие которых определяется оценкой расположения глубинного источника тектонической активности (концепции активного рифтогенеза (Logatchev and Zorin, 1987, Шерман и Леви, 1978, Балла и др., 1990 и др.), пассивного рифтогенеза (Molnar and Tapponier, 1975; Зоненшайн и др., 1978; Petit et al., 1996; Petit and Fournier, 2005; Саньков и др., 2011) и комплексные (Das and Filson, 1975; Мац, 2015). Также сохраняет дискуссионный характер вопрос стадийности развития БРС. Широко распространена гипотеза Н.А. Логачева об этапах "медленного и быстрого рифтинга", согласно которой формирование первых впадин началось в маастрихте и в период до раннего-среднего плиоцена характеризовалось сравнительно низкими скоростями горизонтальных и вертикальных тектонических движений (Логачев, 2003; Мац и др., 2001; Jolivet et al., 2009). Второй этап, продолжающийся в настоящее время, отличается более интенсивными движениями и ответственен за формирование крутосклонных форм горного обрамления впадин (van der Beek, 1996). Таким образом, современный рельеф флангов рифта можно рассматривать как отражение рельефообразующих процессов, характерных для позднего кайнозоя Байкальского региона.

### **1.2. Тектонические аспекты формирования структур горного обрамления впадин БРС**

Развитие горных сооружений, окружающих впадины БРС, происходит в результате комплексного воздействия разнообразных экзогенных процессов и эндогенных факторов, вызывающих поднятие плеч рифта. Как и в случае с общей концепцией байкальского рифтогенеза, единой модели поднятия не существует. На разных этапах развития науки выдвигались различные версии, в той или иной степени соответствующие научным трендам своего времени. Например, в работах (Bullard, 1936; Павловский, 1941) в качестве причины поднятия флангов рифта, рассматривалось сжатие земной коры. В дальнейшем, большинством исследователей было признано доминирование в процессе рифтогенеза растягивающих деформаций, однако общепринятого объяснения, каким образом растяжение приводит к поднятию, к настоящему времени не сформулировано. В качестве непосредственных причин

поднятия обычно рассматриваются термальные факторы, связанные с прямым воздействием теплового потока на литосферу, и механические. Последние предполагают подъем плеч рифта в результате изостатической реакции литосферы на растяжение. В зависимости от модели (Vening Meinesz, 1950; Broun and Beaumont, 1989; Weissel and Karner, 1989; Kuszniir et al., 1987), в качестве такого механизма могут рассматриваться локальная и региональная изостазия, а также их комбинации. В диссертации не ставится задачей анализ глубинных механизмов, вызывающих поднятие плеч рифта, а сам алгоритм поднятия представляется схематично. В целом, он соответствует модели (Kuszniir et al., 1987), предполагающей комбинацию хрупких и вязких деформаций, и подразумевает подъем лежачего крыла сброса на фоне погружения дна впадины за счет локальной и региональной изостазии, не исключая возможной термальной составляющей. Поднятие сопровождается соразмерным погружением дна впадины и компенсируется осадконакоплением, таким образом, положение базиса эрозии - зоны выхода разлома на дневную поверхность - практически не меняется.

### 1.3. Морфология и морфодинамика сбросовых эскарпментов

Горное обрамление впадин БРС характеризуется морфологической неоднородностью, обусловленной явлением структурной асимметрии (Павловский, 1948, Логачев, 1999). Это выражается в развитии более крутых склонов на северных и северо-западных бортах впадин (для внутрисистемных структур одинаково крутыми могут быть оба склона). Было выдвинуто предположение, что эти склоны могут выступать в роли количественных индикаторов позднекайнозойских вертикальных движений, характерных для разломов, с которыми они сопряжены. Г.Ф. Уфимцев определял подобные склоны как "крутые разломные борта рифтовых долин вне контуров распространения кайнозойских отложений" (Уфимцев, 1992). В диссертации для них было предложено более краткое определение "сбросовый эскарпмент", являющееся калькой английского термина "*normal-fault escarpment*" (Bull, 2008). Следует заметить, что этот термин в западной литературе часто используется как синоним понятия "*scarp*" (уступ), однако в данном контексте он подразумевает не только тектонический уступ, но и сопряженный с ним склон.

В общих чертах, эволюция эскарпмента происходит по следующему сценарию (рис. 1). На момент позднекайнозойской активизации, склон представляет собой пологонаклонную поверхность, расчлененную долинами рек (стадия А на рис. 1)). Значительное ускорение поднятия приводит к формированию тектонического уступа, который уже не успевает разрушаться. Поскольку склон изначально был разбит долинами, уступ также разбивается на сегменты, определяющие границы каждого эскарпмента. По мере поднятия, молодой склон прорезается поперечными долинами, водоразделы которых, под воздействием эрозии, приобретают сначала трапецевидную (стадия Б), а затем треугольную (стадия В) в плане форму. На самом уступе это выражается в формировании обособленных граней (базальных фасет) соответствующей формы. Дальнейшее развитие ландшафта зависит от баланса поднятия и экзогенных факторов. В случае соблюдения определенного равновесия треугольные базальные фасеты могут длительное время сохраняться в рельефе. В контексте данной работы эта особенность играет ключевую роль: являясь относительно стабильными формами, треугольные фасеты могут рассматриваться в качестве непосредственных морфометрических индикаторов рельефообразующих процессов, включая тектоническое поднятие. Завершающая фаза развития эскарпмента характеризуется денудацией склона (стадия Г). Достижение ландшафтом данной стадии свидетельствует об изменении баланса рельефообразующих процессов, что может быть связано как со снижением скорости тектонического поднятия, так и с увеличением роли эрозионной составляющей.

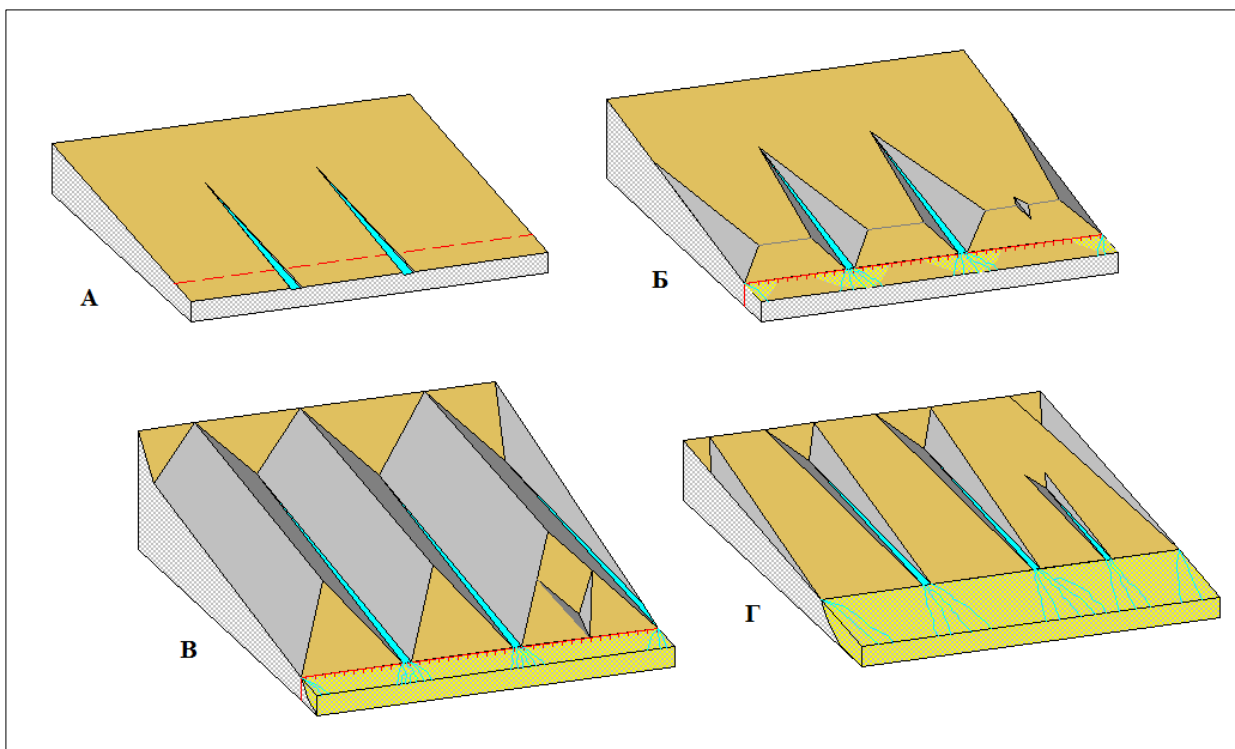


Рис. 1. Общая схема эволюции сбросового эскарпмента

#### 1.4. Классификация сбросовых эскарпментов БРС

Присутствие в рельефе приразломного склона треугольных фасет не является залогом того, что по ним можно судить о позднекайнозойском орогенезе в целом. Информационная значимость фасет зависит от строения эскарпмента, к которому они приурочены, и его окружения. Для выявления объектов, отвечающих задачам исследования, был проведен морфотектонический анализ приразломных бортов большинства впадин БРС. В результате было выделено более трехсот позднекайнозойских эскарпментов и выполнена их классификация по нескольким пунктам:

1. Наличие и форма фасет;
2. Расположение относительно главного водораздельного гребня;
3. Расположение относительно разломов, параллельных главному сместителю.

Первый пункт включает три категории (фасеты отсутствуют, имеют трапециевидную форму, имеют треугольную форму). Дополнительно проводилась оценка их внутренней сохранности. Второй пункт связан с общей протяженностью склона, на котором расположен эскарпмент. Например, на узких линейных хребтах позднекайнозойские эскарпменты могут занимать весь склон от разлома до осевой линии хребта, более широкие склоны предполагают развитие эскарпментов на склонах поперечных водоразделов, разделенных антецедентными долинами. Всего, по данному критерию, было выделено шесть категорий. Последний пункт является наиболее важным, он определяет, пересекается ли позднекайнозойский эскарпмент еще более молодыми разломами. Если это происходит, на склоне формируются ступени, каждая из которых также может представлять собой эскарпмент, но не может свидетельствовать о позднекайнозойском этапе в целом.

По результатам классификации, был сделан вывод, что оптимальными индикаторами позднекайнозойского поднятия в БРС являются крутые приразломные склоны с относительно монолитными треугольными фасетами, без признаков формирования параллельных ступеней. При этом особенности общей орографии горных сооружений принципиальных ограничений не вносят: эскарпменты, отвечающие критериям исследования, могут относиться как к узким линейным структурам, так и к обширным нагорьям.

На основании полученных результатов было сформулировано первое защищаемое положение:

По результатам морфотектонического анализа в рельефе горного обрамления впадин Байкальской рифтовой системы выделен характерный тип присбросовых склонов, особенности морфологии которых позволяют рассматривать данные формы рельефа в качестве морфометрических индикаторов позднекайнозойского поднятия плеч рифта.

## **ГЛАВА 2. МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ РЕЛЬЕФА**

### **2.1. Обзор методов численного моделирования**

Методы математической реконструкции рельефа земной поверхности получили широкое применение в геоморфологии, геотектонике и других науках о Земле. В настоящее время понятие "численное моделирование" является практически тождественным "компьютерному". Разработано множество приложений, направленных на цифровую симуляцию различных рельефообразующих процессов. Особое место среди них занимают программы комплексного моделирования, позволяющие получать трехмерные модели рельефа в динамике, с учетом разнообразных факторов, включая тектонику, русловые, склоновые и другие процессы (SIBERIA (Willgoose, 1991), GILBERT (Chase, 1992), CAESAR (Coulthard, 1996), TISC (Garcia-Castellanos, 1997), CASCADE (Broun and Sambridge, 1997), WILSIM (Luo, 2002) и др.). В России данное направление развито не так широко, можно выделить исследования

### **2.2. Программа численного моделирования CHILD**

Для численной реконструкции развития рельефа в работе использовалась программа комплексного математического моделирования CHILD (Channel-Hillslope Integrated Landscape Development), разработанная доктором геологии Университета Колорадо (Боулдер, США) Г. Такером (Tucker, 2010). Программа представляет собой многофункциональный инструмент, позволяющий воссоздавать эволюцию рельефа земной поверхности в 3D-координатах (рис. 2). В качестве факторов, регулирующих высоту узлов модели на каждом этапе развития, в модели могут рассматриваться тектонические движения, русловые и склоновые эрозионно-аккумулятивные процессы, климатические явления, стратиграфия и др. Последний релиз программы включал 19 сценариев тектонического развития, однако оригинальная версия CHILD не включает возможности изменения угла падения разлома при моделировании поднятия или опускания. Однако в условиях БРС, сбросы, ограничивающие впадины, обычно имеют падение 50-70°. Для приближения модели к реальной кинематике, в программу был добавлен дополнительный сценарий, разработанный совместно с коллегами из ИДСТУ СО РАН. В качестве базового, послужил сценарий Strike-slip, включающий поднятие со сдвигом. Поменяв направление движения, мы получили симуляцию поднятия с горизонтальным смещением от разлома в направлении вершины. Исходные позиции переместившихся узлов, в этом случае, занимают новые ячейки, тем самым имитируется выход плоскости разлома на дневную поверхность (рис. 3).



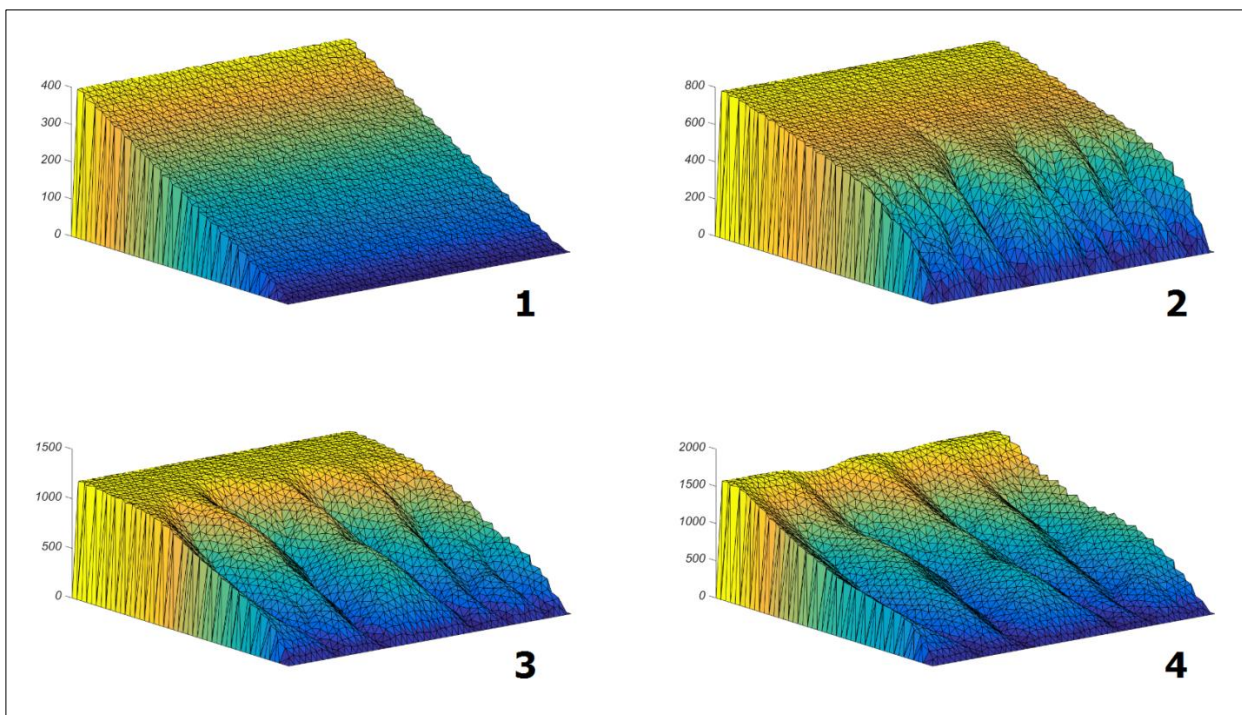


Рис. 2. Пример моделирования эволюции абстрактного склона в программе CHILD (Tucker, 2010) с использованием тектонического сценария “Uplift”, предполагающего строго вертикальное поднятие всех узлов модели.

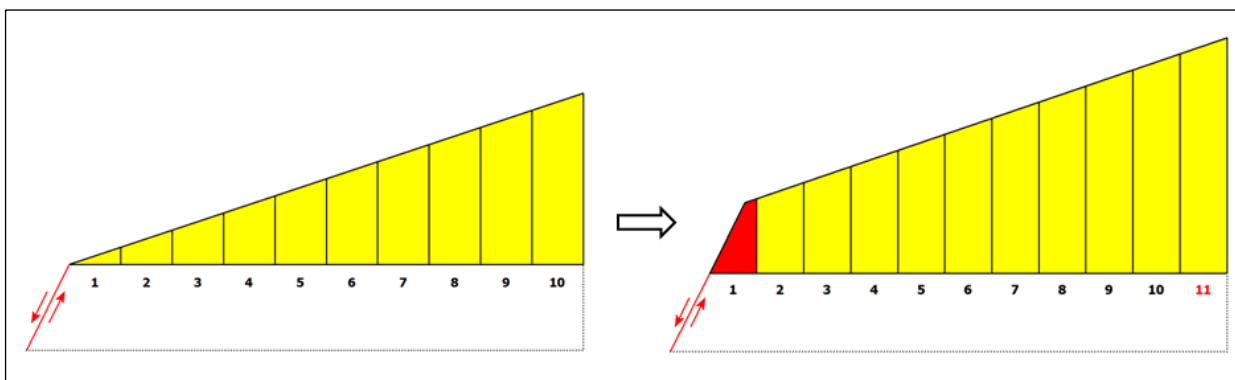


Рис. 3. Схема моделирования поднятия по разлому с падением, отличным от вертикального.

Также автором были разработаны универсальный калькулятор, позволяющий оперативно вычислять вводные параметры модели, и новая методика создания исходной поверхности. Последний пункт связан со следующим условием эксперимента: поскольку в качестве непосредственных индикаторов поднятия в каждом эскарпменте рассматриваются конкретные фасы, для моделирования воссоздается абстрактная поверхность, представляющая собой сочетание однородных водоразделов, соответствующих ширине выбранной фасы.

### ГЛАВА 3. КОМПЛЕКСНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКИХ ЭСКАРПМЕНТОВ БРС

#### 3.1. Определение вводных параметров и реконструкция развития эталонного объекта

Изменение высотных отметок земной поверхности является результатом совместного воздействия эндо- и экзогенных факторов, соответственно, каждый из трех компонентов может быть вычислен, при условии, что известны два других. В качестве эталонного объекта, для которого имеются данные по двум компонентам, использовался эскарпмент,

расположенный на Баргузинском хребте, в обрамлении Улюнской впадины. Он соответствует критериям отбора, сформулированным в главе 1, и характеризуется известным аппроксимированным значением скорости позднекайнозойского поднятия (0,4 мм/год), определенным по данным трекового датирования по апатитам (Jolivet et al, 2009). Рельеф земной поверхности был взят из данных SRTM. Ключевым граничным условием эксперимента является допущение об однородности климатических параметров во времени и пространстве, основанное на анализе вариаций климата в позднем кайнозое Прибайкалья (Воробьева и др., 1995). Было сделано предположение, что современные климатические характеристики можно признать средними для всего исследуемого периода и актуальными, в контексте поставленной задачи, для всей территории БРС. В результате серии экспериментов, включающих вычисление и тестирование различных экзогенных параметров, был определен набор параметров, который, в сочетании с известной скоростью поднятия, позволяет реконструировать искомый рельеф. По результатам исследования, приведенным в разделах 2.2. и 3.1., было сформулировано второе защищаемое положение:

Предложенный комплексный подход, основанный на методах морфотектонического анализа и численного моделирования, позволяет реконструировать позднекайнозойское развитие горного обрамления впадин БРС с учетом широкого спектра взаимосвязанных эндогенных и экзогенных рельефообразующих процессов.

### 3.2. Численное моделирование позднекайнозойской эволюции эскарпментов БРС и определение скорости тектонического поднятия

Гипотетическая однородность климатических характеристик позволила санкционировать следующее условие, согласно которому для эскарпментов со схожими прочностными характеристиками горных пород можно принять общий набор экзогенных параметров, полученный на предыдущем этапе, с учетом особенностей локальной геометрии. Таким образом, мы можем определить тектоническую составляющую для других сегментов БРС. По результатам классификации был выбран ряд эскарпментов, расположенных в различных районах рифтовой системы. Скорость поднятия в моделях варьировала от 0,1 мм/год до 1 мм/год и выше. Время активизации для большинства эскарпментов тестировалось в двух вариантах: 5 млн. лет (Jolivet et al., 2009) и 3,5 млн. лет (Мац и др., 2001). Также для отдельных сегментов тестировались более поздние значения. Были получены модели для 11 объектов, расположенных на склонах Баргузинского, Байкальского, Северо-Муйского хребтов, Святоносского поднятия, хребта Кодар, Южно-Муйского и Муяканского хребтов, Тункинских гольцов. Эксперимент показал, что модели рельефа эскарпментов, максимально соответствующие реальной топографии, были получены при относительно небольших значениях скорости поднятия, варьирующих в узком диапазоне 0,3 – 0,5 мм/год. При этом, в ряде случаев, искомые результаты были получены при разных значениях времени активизации, но равных скоростях поднятия, что может свидетельствовать о стабильном развитии ландшафта по достижении стадии треугольных фасет. На рис. 4а-б показан пример реконструкции, выполненной для сегмента Северо-Муйского хребта, обрамляющего с юга Верхнеангарскую впадину. Наиболее высокая степень морфометрического соответствия современному рельефу в данном эксперименте была достигнута при скорости 0,35 мм/год вне зависимости от времени предполагаемой позднекайнозойской активизации. Выбор более вероятного временного интервала здесь и в других подобных случаях определялся эмпирическими представлениями об относительной зрелости или молодости отдельных сегментов, основанными на морфологических различиях между ними. При этом цель определения временных параметров позднекайнозойского развития в исследовании не ставилась.

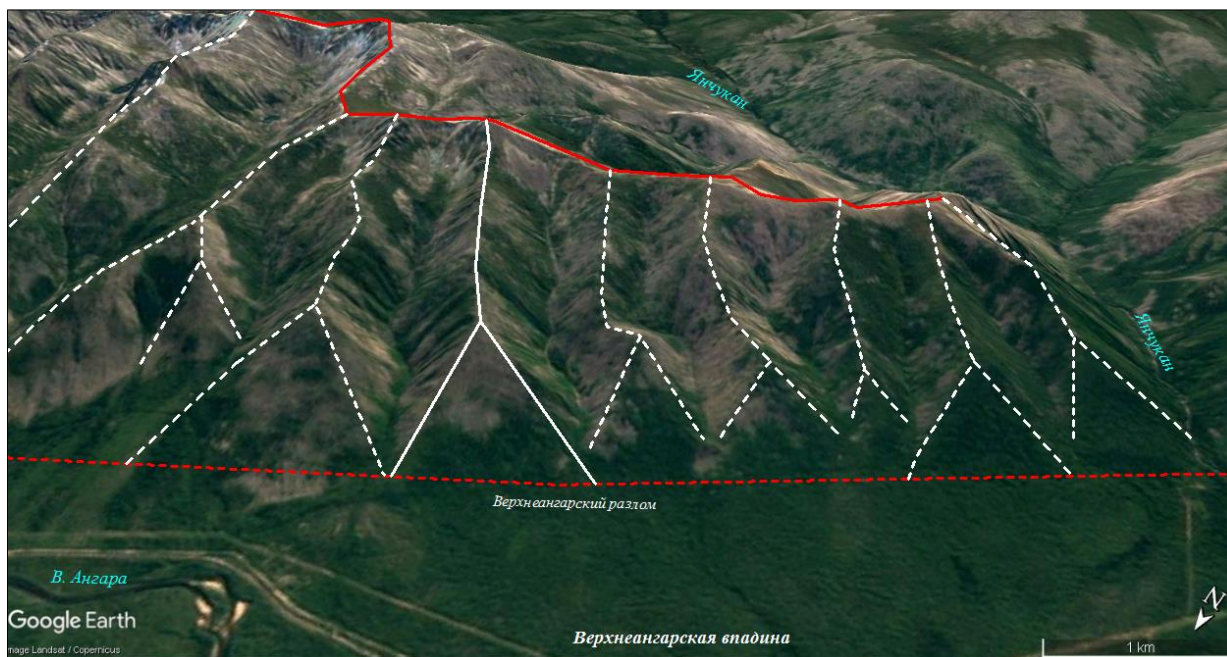


Рис. 4а. Сегмент NMW-16 (Северо-Муиский хребет, Верхнеангарская впадина)

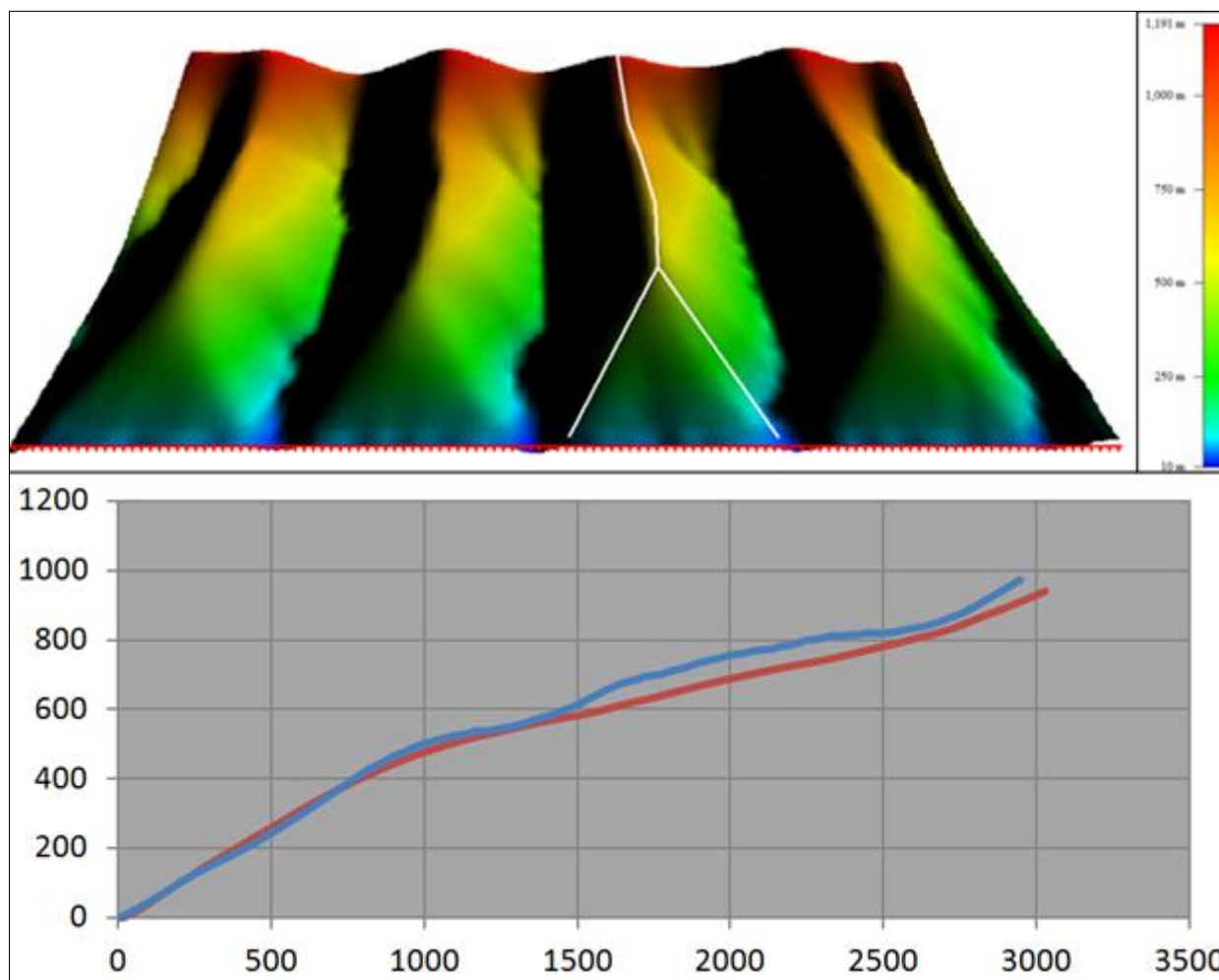


Рис. 4б. Результат моделирования объекта NMW-16 (скорость поднятия 0,35 мм/год; время активизации 3,5 млн. лет)

## ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 4.1 Анализ результатов численного моделирования

По результатам анализа результатов моделирования была установлена устойчивая корреляция ( $>0,8$ ) между высотой фасеты и скоростью поднятия, что позволяет использовать данный морфометрический параметр для предварительной оценки тектонической активности эскарпментов БРС. Было выдвинуто предположение, что для объектов с близкими морфометрическими параметрами должны быть характерны общие значения скорости и времени поднятия. Это позволяет расширить географию оценок путем выявления эскарпментов, схожих с объектами моделирования или расположенных на одной с ними ветви разлома, а также приуроченных к единому блоку. В результате комплексного морфотектонического анализа приразломных склонов, руководствуясь критериями предложенной классификации, путем экстраполяции данных, были установлены вероятные скорости вертикальных движений для некоторых других эскарпментов БРС (рис. 5). На завершающем этапе анализа была дана общая оценка скорости поднятия приразломных плеч рифта для большинства впадин БРС (рис. 6), позволившая установить следующую закономерность: плечи рифта, ограничивающие впадины с севера и северо-запада, характеризуются более высокими скоростями позднекайнозойского поднятия, чем блоковые поднятия юго-восточных флангов, что коррелирует с представлениями о структурной асимметрии байкальского типа. По итогам исследования было сформулировано третье защищаемое положение:

По результатам численного моделирования показано, что скорости позднекайнозойского поднятия горного обрамления впадин БРС варьируют в диапазоне аппроксимированных значений 0.3-0.5 мм/год, при этом скорости поднятий северных и северо-западных бортов рифтовых впадин превышают значения, характерные для южных и юго-восточных плеч рифта. Устойчивая корреляционная зависимость между модельными параметрами поднятия и морфометрическими показателями рельефа эскарпментов, позволяет экстраполировать параметры модели на объекты, характеризующиеся схожими морфометрическими свойствами и оценить скорости вертикальных движений по разломам региона.

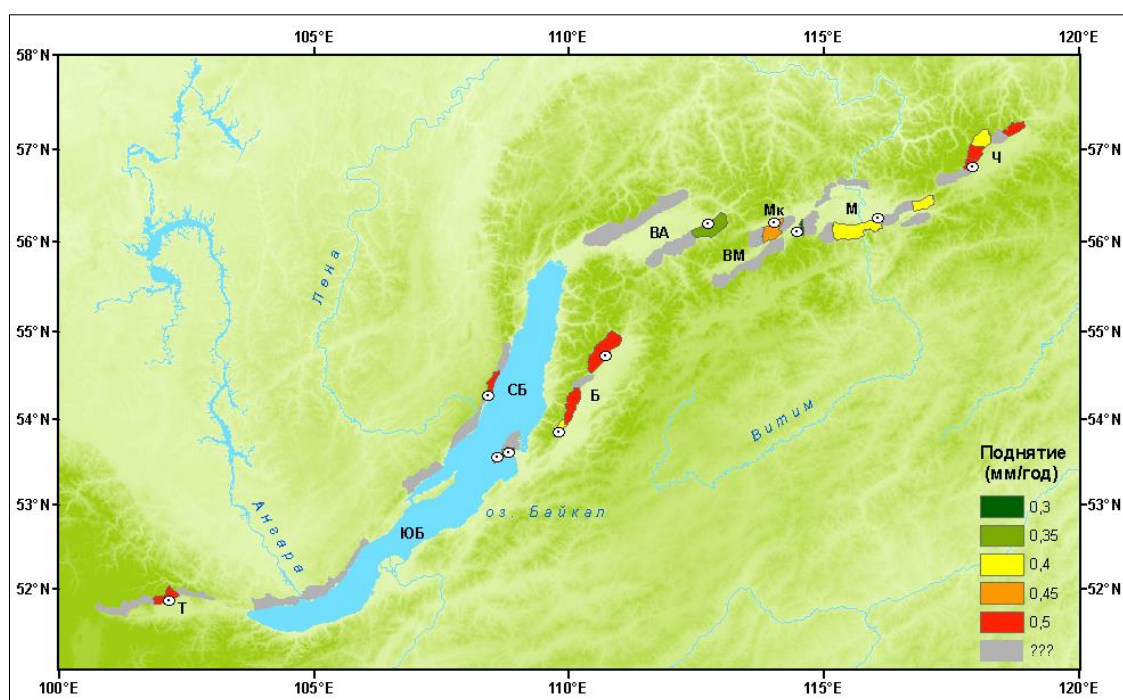


Рис. 5. Скорости поднятия сегментов горного обрамления впадин БРС по результатам моделирования и экстраполяции значений

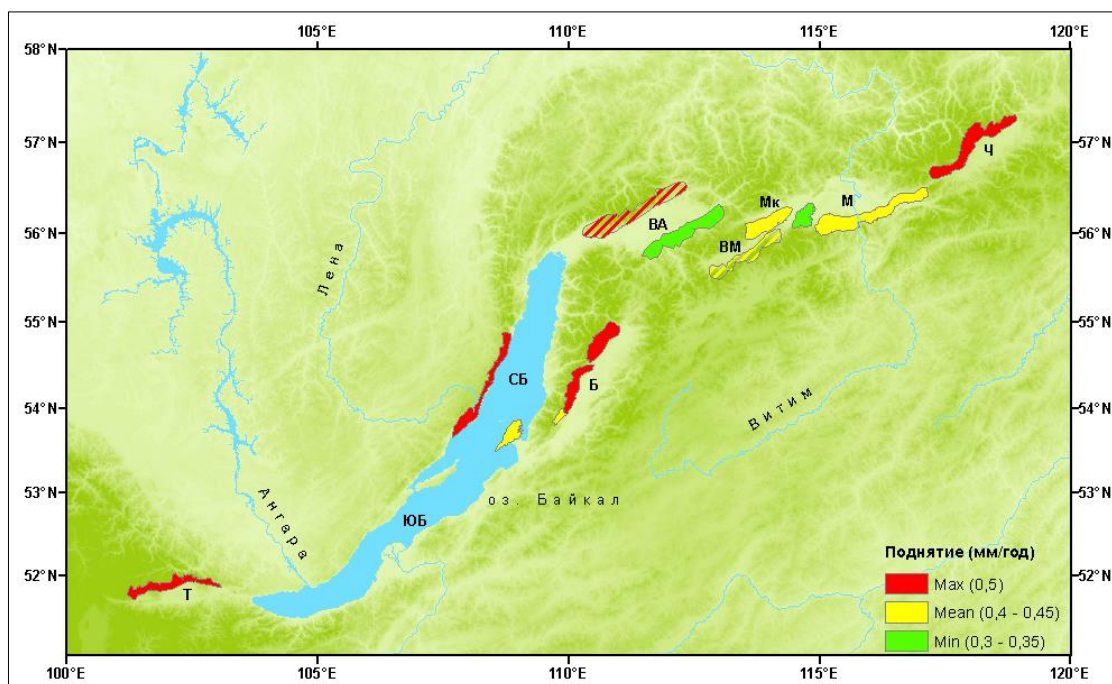


Рис. 6. Предполагаемые скорости поднятия плеч рифтовых впадин БРС

Цветом показаны генерализованные зоны с максимальными, средними и минимальными значениями; полосчатым паттерном показаны зоны, выделенные исключительно на основании сравнительного анализа.

#### 4.2 Сравнительный анализ результатов исследования

Проведен сравнительный анализ результатов моделирования/экстраполяции и оценок скорости вертикальных движений, полученных другими исследователями. Результаты эксперимента, в целом, близки к значениям, вычисленным автором по данным карты неотектонических движений (Леви, 2008) с привлечением оценок возраста активизации (Логачев, 1996; Мац и др., 2001; Jolivet et al., 2009). Решения (Petit et al, 2009), также полученные по результатам численного моделирования, для некоторых объектов демонстрируют схожие значения, либо более высокие, что особенно заметно на примере Баргузинского хребта. В сравнении с плейстоцен-голоценовыми оценками, полученные нами значения либо сопоставимы, либо отличаются меньшими величинами. Данные современных инструментальных измерений демонстрируют значительно более высокие оценки.

Сравнительный анализ результатов исследования и сейсмичности БРС не показал очевидных закономерностей. Однако следует заметить, что объекты моделирования, расположенные на склонах Кодара и Южно-Муйского хребта, приурочены к структурам, с которыми связаны крупнейшие землетрясения – Чарское (1994) и Муйское (1957). Вместе с тем, многие, морфологически подобные им, объекты реконструкции расположены на разломах, способных генерировать сильные землетрясения (Смекалин и др., 2010), но относительно спокойных в последнее столетие. Данный факт заставляет обратить на эти структуры особое внимание.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования был выполнен морфотектонический анализ склонов приразломных блоковых структур горного обрамления впадин Байкальской рифтовой системы, названных здесь "эскарпментами". Проведена классификация эскарпментов по структурным, морфологическим и морфометрическим критериям. На основании данной классификации были выделены объекты, формировании которых, как предполагается, связано с этапом позднекайнозойской тектонической активизации. Важнейшим морфологическим элементом этих структур являются треугольные тектогенные грани – фасеты, которые в

совокупности с другими элементами эскарпмента можно рассматривать в качестве количественных индикаторов вертикальных тектонических движений. Информационная значимость фасет зависит от строения эскарпментов, к которым они приурочены. На основании проведенной классификации были выделены эскарпменты, свойства которых позволяют использовать эти объекты в экспериментах по численному моделированию развития рельефа.

Инструментальную основу эксперимента составила программа комплексного математического моделирования эволюции рельефа CHILD [Tucker, 2010]. В ходе работы над диссертацией, программа была модифицирована для реалистичной реконструкции сбросовой тектоники, разработаны новые методологические подходы.

В результате моделирования эталонного эскарпмента, для которого были известны тектонические параметры, были получены количественные характеристики, отражающие аппроксимированные экзогеодинамические условия позднего кайнозоя БРС. Применение полученного набора параметров к другим выбранным эскарпментам, расположенным в разных районах рифтовой системы, позволило построить модели их позднекайнозойского развития и определить количественные параметры поднятия. Было установлено, что аппроксимированные позднекайнозойские скорости поднятия варьируют в узком диапазоне 0.3 – 0.5 мм/год. Результаты моделирования были экстраполированы на объекты, схожие по структурным и морфометрическим характеристикам, что позволило расширить географию исследования.

Предложенный метод следует рассматривать как инструмент экспресс-оценки позднекайнозойской тектонической активности на привпадинных разломах БРС. В перспективе предполагается его модификация с целью снижения роли избирательности при поиске объектов реконструкции.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в рецензируемых журналах*

1. Jolivet M., De Boisgrollier T., Petit C., Fournier M., Sankov V.A., Ringenbach J.-C., **Byzov L.**, Miroshnichenko A.I., Kovalenko S.N., Anisimova S.V. How old is the Baikal Rift Zone? Insight from apatite fission track thermochronology, *Tectonics*, 2009, 28, TC3008, doi:10.1029/2008TC002404.

2. Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., **Бызов Л.М.**, Дембелов М.Г., Кале Э., Девершер Ж. Растяжение в Байкальском рифте: современная кинематика пассивного рифтогенеза // Доклады Академии наук, 2009, Т.424. №5. – С. 664–668.

3. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.А., **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.

4. Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Добрынина А.А., Ашурков С.В., **Бызов Л.М.**, Дембелов М.Г., Кале Э., Девершер Ж. Современные горизонтальные движения и сейсмичность южной части Байкальской впадины (Байкальская рифтовая система)// Физика Земли, 2014, № 6. – С. 70–79.

5. **Бызов Л.М.**, Саньков В.А. Математическое моделирование эволюции рельефа сбросового уступа на примере Святоносского поднятия (Байкальская впадина) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2015. Т. 12. С. 12–22.

6. Саньков В.А., Парфеевец А.В., Мирошниченко А.И., **Бызов Л.М.**, Лебедева М.А., Саньков А.В., Добрынина А.А., Коваленко С.Н. Позднекайнозойское разломообразование и напряженное состояние юго-восточной части Сибирской платформы // Геодинамика и тектонофизика, 2017, Т. 8, № 1. – С. 81-105.

7. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Саньков А.В., **Бызов Л.М.** Тектонические деформации и последующие сейсмические события юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы по данным GPS-измерений // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2021, Т. 500, №1. – С. 58-63.

### *Материалы и тезисы докладов научных конференций*

1. Бызов Л.М., Саньков В.А., Добрынина А.А., Лухнев А.В. Соотношение горизонтальных и вертикальных движений в зоне сжатия континентальной литосферы // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы ХLI Тектонического совещания. Том 2. – М.: ГЕОС, 2008. - С.118-122.

2. Бызов Л.М., Саньков В.А. О соотношении горизонтальных и вертикальных движений земной коры // Кайнозойский континентальный рифтогенез: материалы Всероссийского научного симпозиума, посвященном памяти Н.А. Логачева. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010. Т.1. С.86-87.

3. Бызов Л.М., Саньков В.А. Опыт комплексного математического моделирования позднекайнозойской эволюции рельефа Баргузинского хребта // Материалы Всероссийской конференции с участием иностранных учёных "Процессы самоорганизации в эрозионно-русловых системах и динамике речных долин "Fluvial systems-2012" (г. Томск, 3-12 июля 2012 г.) - Томск: ИМКЭС СО РАН.

4. Бызов Л.М., Саньков В.А. Реконструкция развития рельефа на сбросовых уступах в Байкальском рифте с применением методов математического моделирования // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы: Материалы Второго Всероссийского симпозиума с международным участием и молодежной научной школы, посвященных памяти академиков Н.А. Логачева и Е.Е. Милановского / Под редакцией С.В. Рассказова, А.М. Никишина, С.П. Приминой. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2013. – В 2-х томах. – Т. 2. – С.49-53.

5. Byzov L.M., Sankov V.A. Numerical reconstruction of Late-Cenozoic evolution of normal-fault scarps in Baikal Rift Zone // Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-556, 2014

6. Бызов Л.М. Математическое моделирование позднекайнозойской эволюции сбросовых уступов Байкальской рифтовой системы // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике (Иркутск, 19–23 сентября 2016 г.) – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. – С. 212-214

7. Бызов Л.М. Комплексное математическое моделирование эволюции горного обрамления впадин Байкальской рифтовой системы // Материалы IV Байкальской молодежной научной конференции по геологии и геофизике (Улан-Удэ – Горячинск, 21-26 августа 2017) – Улан-Удэ: ГИН СО РАН, 2017.

8. Бызов Л.М. Эволюция горного обрамления впадин Байкальской рифтовой системы в позднем кайнозое // Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона: результаты многолетних исследований и научно-образовательная политика (к 100-летию ИГУ) : тез. докл. XII Рос.-монг. междунар. конф. / РАН, Сиб. отд-ние, Иркут. науч. центр, Ин-т земной коры, Ин-т солн.- зем. физики. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2018. – 173 с.

9. Бызов Л.М. Цифровая реконструкция формирования горного обрамления впадин БРС // Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы: Материалы IV

Всероссийского симпозиума с участием иностранных ученых, посвященного 90-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева (Иркутск, 14–15 октября 2019 г.) / Под редакцией С.В. Рассказова, С.П. Приминной. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2019.

10. Бызов Л.М. Оценка скоростей позднекайнозойских вертикальных движений горного обрамления впадин Байкальской рифтовой системы по результатам математического моделирования эволюции рельефа // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: тезисы докладов Всероссийского совещания с участием приглашенных исследователей из других стран, посвященного памяти профессора С.И. Шермана. Иркутск, 26–30 апреля 2021 г. / ФГБУН ИЗК СО РАН; ФГБОУ ВО «ИГУ»; отв. ред. К. Ж. Семинский. – Иркутск: Издательство ИГУ, 2021 – 111-112

Подписано в печать 12.05.2022г. Формат 60×84 1/16

Бумага офсетная. Печать Riso.

Усл. печ. л. 1,30. Уч.-изд. л. 1,20. Тираж 150 экз. Заказ 270.

Отпечатано в Институте земной коры СО РАН

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128.