

Геоинформатика. 2023. № 3. С. 55–62.
Geoinformatika. 2023;(3):55–62.

Моделирование геообъектов и геопроцессов

Научная статья
 УДК 551.24.02
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-3-55-62>

Опыт численного моделирования эволюции рельефа приразломных склонов горного обрамления впадин Байкальской рифтовой системы

© 2023 г. — Л.М. Бызов^{1, а)}, В.А. Саньков^{1, б)}, М.Ю. Кензин^{2, в)}, С.А. Ульянов^{2, д)}

¹ Институт земной коры СО РАН; Россия, г. Иркутск

² Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН; Россия, г. Иркутск

^{а)}leo212002@yandex.ru, ^{б)}sankov@crust.irk.ru, ^{в)}sau@icc.ru, ^{д)}gorthauers@gmail.com

Аннотация: В работе рассматривается новая методика определения количественных параметров рельефообразующих процессов, характерных для горного обрамления впадин Байкальской рифтовой системы (БРС), основанная на использовании компьютерной программы численного моделирования эволюции рельефа CHILD. Особый акцент был сделан на вычислении аппроксимированных значений скорости тектонического поднятия приразломных блоковых структур Байкальского рифта. Новизна исследования заключается в адаптации программы CHILD для решения задач сбросовой тектоники, а также в разработке алгоритма морфотектонического анализа, направленного на поиск специфических геоморфологических объектов, которые могут рассматриваться роли индикаторов поднятия. В результате серии экспериментов, выполненных с привлечением радиоизотопных данных, были получены трехмерные модели, имитирующие развитие присбросовых склонов на позднекайнозойском этапе развития БРС, и определены вероятные скорости вертикальных движений по разломам региона. Было установлено, что средние позднекайнозойские скорости поднятия варьируют в узком диапазоне 0,3–0,5 мм/год, при этом более высокие значения приурочены к северным и северо-западным бортам.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, морфотектоника, Байкальская рифтовая система, эволюция рельефа, тектоническое поднятие

Для цитирования: Бызов Л.М., Саньков В.А., Кензин М.Ю., Ульянов С.А. Опыт численного моделирования эволюции рельефа приразломных склонов горного обрамления впадин Байкальской рифтовой системы // *Геоинформатика*. — 2023. — № 3. — С. 55–62. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-3-55-62>.

Modeling of geological objects and geoprocesses

Original article

Landscape evolution modeling of the normal-fault scarps (Baikal rift system): new experience

© 2023 — L.M. Byzov^{1, а)}, V.A. Sankov^{1, б)}, M.Yu. Kenzin^{2, в)}, S.A. Ulyanov^{2, д)}

¹ Institute of the Earth's Crust SB RAS ; Irkutsk, Russia

² Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS; Irkutsk, Russia

^{а)}leo212002@yandex.ru, ^{б)}sankov@crust.irk.ru, ^{в)}sau@icc.ru, ^{д)}gorthauers@gmail.com

Abstract: The paper considers a new method for determining the quantitative parameters of the relief-forming processes characteristic of the mountainous framing of the basins of the Baikal Rift System (BRS), based on the use of a computer program for numerical simulation of the evolution of the relief CHILD. Particular emphasis was placed on the calculation of approximate values of the rate of tectonic uplift of the near-fault block structures of the Baikal rift. The novelty of the study lies in the adaptation of the CHILD program for solving fault tectonics problems, as well as in the development of a morphotectonic analysis algorithm aimed at searching for specific geomorphological objects that can be considered as uplift indicators. As a result of a series of experiments performed using radioisotope data, three-dimensional models were obtained that simulate the development of near-fault slopes at the Late Cenozoic stage of the development of the BRS, and the probable rates of vertical movements along the faults of the region were determined. It was found that the average Late Cenozoic uplift rates vary within a narrow range of 0,3–0,5 mm/yr, with higher values associated with the northern and northwestern flanks.

Key words: *Landscape evolution modeling, tectonic geomorphology, Baikal Rift System, tectonic uplift*

For citation: Byzov L.M., Sankov V.A., Kenzin M.Yu., Ulyanov S.A. Landscape evolution modeling of the normal-fault scarps (Baikal rift system): new experience. *Geoinformatika*. 2023;(3):55–62. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-3-55-62>. In Russ.

Введение

Реализация многих научных и прикладных задач в геологии требует количественной оценки рельефообразующих процессов. Однако практические возможности подобных исследований, как

правило, имеют существенные ограничения. С одной стороны, они связаны со сложностью непосредственных измерений, что особенно характерно для оценки экзогенных процессов. Другой аспект проблемы заключается в ничтожно малых сроках ин-

струментальных исследований, ограничивающих возможности экстраполяции данных на геологически значимые периоды времени. В качестве варианта решения этого вопроса могут рассматриваться методы численного моделирования эволюции рельефа, позволяющие анализировать геологические процессы в ретроспективе, а также выявлять недостающие звенья в цепи рельефообразования.

Одной из задач, решение которых предполагает возможность использования численного моделирования, является оценка скорости поднятия горного обрамления рифтовых впадин. Определение этого параметра имеет важное значение как для общего понимания геодинамики рифтовых систем, так и для реализации различных практических задач. Существует множество подходов к вычислению скорости тектонического поднятия, от структурно-геологических до радиоизотопных, каждый из которых имеет свои плюсы и минусы. Несомненным достоинством моделирования является комплексность метода, которая позволяет комбинировать всю имеющуюся информацию для получения общего сценария развития рельефа. Основным недостатком численных реконструкций представляется их идеализированность — объективно воссоздать сложные геологические процессы практически невозможно. Однако определенная субъективность характерна и для других методов, где она может стать причиной критической ошибки. В моделировании же неверного решения не может быть априори — любой сценарий, не соответствующий реальному, следует рассматривать как вариант развития событий. Это позволяет тестировать множество разнообразных параметров, эмпирическим путем определяя наиболее вероятные значения. Разумеется, при проведении подобных экспериментов необходимо иметь некоторое представление о том, что происходило на рассма-

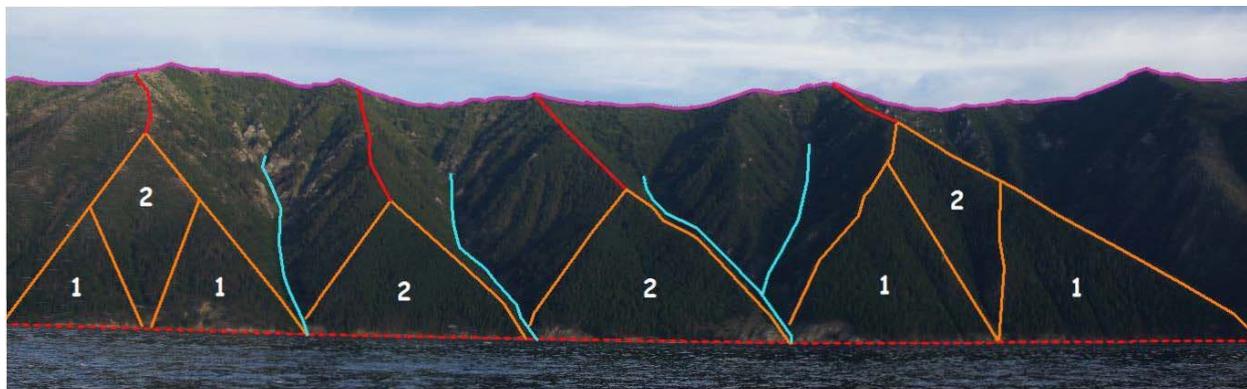
триваемой территории, какие процессы формировали рельеф, как долго это продолжалось. Кроме того, очень важно понимать, что именно в рельефе может выступать в качестве индикатора искомого параметра — в данном случае, скорости поднятия. Для решения поставленных задач нами была разработана методика, объединяющая морфотектонический анализ и численное моделирование. Подробное описание геоморфологической части исследования приведено в работе [1], в настоящей публикации акцент сделан на методике моделирования.

Геодинамические и геоморфологические основы эксперимента

В качестве объекта исследования в работе рассматривается Байкальская рифтовая система (БРС) — совокупность тектогенных впадин в обрамлении альпинотипных горных сооружений. Геодинамика БРС остается предметом дискуссий, в том числе это касается вопросов эволюции горного обрамления. В настоящем исследовании в качестве рабочей модели принимается, что его формирование обусловлено поднятием плеч рифта, связанным с явлениями локальной и региональной изостазии, которые, в свою очередь, вызваны растяжением литосферы. Разломы, ограничивающие байкальскую впадину, как правило, представляют собой сбросы и сбросо-сдвиги, при этом влияние разломной тектоники на разных флангах БРС неравнозначно — в представленном эксперименте рассматриваются только блоковые структуры с ярко выраженными магистральными разломами. Характерными элементами рельефа приразломных склонов, для которых мы предложили использовать термин «эскарпмент», являются крутые тектонические уступы, как правило, разбитые речными долинами на отдельные грани — фасеты (рис. 1). Эволюция

Рис. 1. Сбросовый эскарпмент, Святоносское поднятие (фото В.А. Санькова)

Fig. 1. Normal-fault escarpment, Svyatoy Nos Upland (photo by V.A. Sankov)



Цветаи обозначены главные структурные линии: фиолетовый — гребень хребта, красный — водораздельные гребни эскарпмента (вершинные скаты), голубой — русла временных водотоков, оранжевый — базальные фасеты (цифры обозначают порядок объекта); красной штрих-линией показана зона разлома

Color lines: purple — ridge crest, red — spurs, blue - transient channels, orange — facets (numbers are facet's order), red — fault line

фасет подчинена сбалансированному воздействию различных рельефообразующих факторов — тектонического поднятия, русловых и склоновых процессов. В зависимости от сочетания этих факторов и стадии развития, фасеты могут быть трапециевидными или треугольными. Последние являются относительно стабильными формами, что позволяет рассматривать их в качестве непосредственных индикаторов процессов рельефообразования, при этом информационная значимость фасет зависит от особенностей эскарпментов, к которым они приурочены, и от конкретных задач исследования.

Формирование структур горного обрамления БРС большинство исследователей связывает с этапом плиоцен-четвертичной активизации рифтогенеза [3, 4]. Скорости тектонических движений на более ранней стадии развития рифта, когда были заложены контуры большинства впадин, оцениваются на порядок ниже [6], что делает маловероятным формирование крутосклонных форм до начала активной фазы. Задача эксперимента заключалась в вычислении средней скорости поднятия того или иного тектонического блока, характерной для всего периода активизации. Особенности задачи определили одно из главных условий эксперимента — фасеты, выбранные для исследования, должны отражать весь этап поднятия, что исключает из работы ступенчатые склоны, если только обособление ступеней не произошло до начала активной стадии. Это существенно ограничило число подходящих объектов, поскольку большинство эскарпментов в БРС разбиты позднекайнозойскими ступенями. Вместе с тем, такой аппроксимированный подход позволил более свободно отнестись к факторам климата. Климатические параметры и связанные с ними процессы в эксперименте рассматриваются как средние для всего моделируемого этапа и соответствуют современным значениям, — косвен-

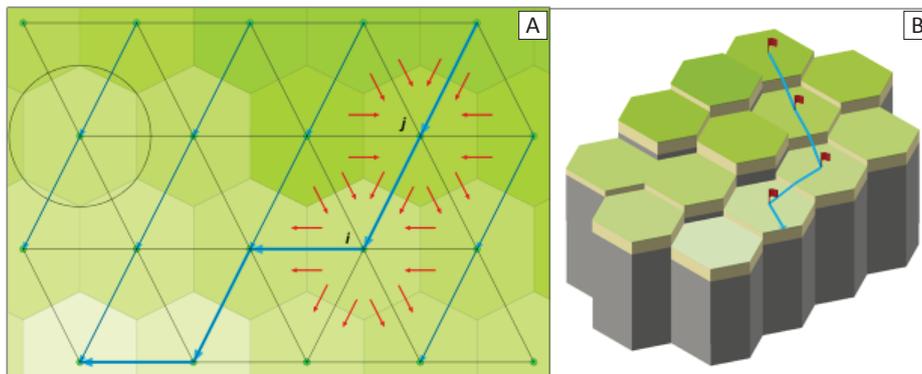
ным подтверждением правомерности подобного решения могут служить результаты палеоклиматической реконструкции [2]. Кроме того, указанные значения принимаются едиными для всей территории БРС, что также допустимо с учетом степени генерализации данных.

Программа CHILD

В качестве основного инструмента в работе использовалась программа комплексного математического моделирования эволюции рельефа CHILD (Channel-Hillslope Integrated Landscape Development), разработанная в Университете Колорадо [10]. Программа позволяет создавать трехмерные динамические модели земной поверхности с учетом множества рельефообразующих факторов, включая тектонику, русловые процессы (эрозия, транспорт и осадконакопление), медленный крип и быстрые склоновые процессы. Кроме того, CHILD содержит модули, позволяющие моделировать формирование меандр, пойменное осадконакопление, эоловые процессы; также программа позволяет учитывать особенности стратиграфии и влияние растительного покрова на эрозионную устойчивость ландшафтов. Программа написана на языке C++ для ОС Linux, при этом есть возможность ее использования на платформах Mac и Windows с помощью эмулятора Cygwin. Собственными инструментами визуализации программа не располагает, предусматривая для этих целей MatLab или Surfer, что позволяет преобразовывать результаты реконструкции практически в любой формат, поддерживаемый ГИС.

Рабочая область модели, имитирующая участок земной поверхности, представляет собой набор узлов Ni, соединенных сетью треугольников (рис. 2А). Сеть строится с использованием триангуляции Делоне, т.е. окружность, проведенная че-

Рис. 2. Рабочая область модели CHILD
 Fig. 2. Sample preparation and chemical analysis steps



А — вид сверху: черными линиями показаны ребра треугольников Делоне, соединяющих узлы триангуляционной сети; серыми — грани полигонов Вороного; голубые стрелки обозначают направления флювиального стока, красные — направления диффузионного переноса; В — трехмерная визуализация модели: темная часть призмы отражает коренные породы, светлая — реголитовый слой
 A — 2D view: black lines — Delaunay's edges, gray — Voronoi polygon's edges, blue arrows — direction of the fluvial discharge, red arrows — direction of the diffusion transport; B — 3D view: dark part of the prism — rock layer, light part — regolith layer

рез три вершины любого треугольника, не может включать других узлов. Каждому узлу соответствует собственный шестигранный полигон Вороного, вершины которого совпадают с центрами описанных окружностей прилегающих треугольников. В трехмерной проекции полигон представляет собой основание призмы, имитирующей геологический разрез (рис. 2В). В упрощенном виде модель предполагает деление этого разреза на два слоя — коренной и реголитовый, однако функционал программы позволяет рассматривать и более сложную стратиграфическую дифференциацию. Алгоритм построения модели CHILD включает три основных механизма — флювиальные процессы, склоновый перенос и тектонические процессы. Маршрутами речного стока выступают ребра треугольников Делоне, при этом сток осуществляется в направлении максимального уклона — иными словами, вся вода и эродированный донный материал из точки j перемещаются в точку i , если последняя расположена ниже других соседей узла j . Перенос склоновых отложений, не связанный с формированием русел, в модели описывается механизмами диффузии. Как и в случае с русловым переносом, материал из каждого полигона Вороного перемещается в соседние полигоны, занимающие более низкое положение, однако течение не ищет единственный путь, но распределяется по всем соседям, пропорционально градиенту высоты. Моделирование тектонических процессов предполагает эндогенное изменение высоты каждой призмы: наиболее простой вариант подразумевает тривиальное поднятие или опускание, однако программа позволяет реализовывать и более сложные сценарии, один из которых будет рассмотрен ниже.

В целом, моделирование CHILD можно представить как итеративное вычисление высотного положения каждого узла и связанной с ним ячейки Вороного относительно некоторого базисного уровня (ряд тектонических сценариев также предполагает вычисление горизонтального смещения). Изменение высоты некоторого узла i можно записать в виде формулы, подобной уравнению непрерывности:

$$\frac{\partial z_i}{\partial t} = U(t) + \left(\left(\frac{\sum_{j=1}^n Q_j}{(1-\nu)\Lambda_i} - Q_i \right) + \left(-\frac{K_d}{\Lambda_i} \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \frac{z_i - z_j}{L_{ij}} \right) \right), \quad (1)$$

где z — высота узла, t — время, $U(t)$ — тектоническая составляющая изменения высоты, Q — твердый сток (Q_j — входящий, Q_i — исходящий), n — число узлов, осуществляющих сток в узел i , ν — пористость отложений, Λ_i — площадь ячейки i , K_d — коэффициент диффузии (зависит от толщины экзогенно-активного слоя и скорости движения твердого материала по склону), n^* — число узлов, связанных с узлом i , L_{ij} — длина ребра треугольника, соединяющего узлы

i и j , λ_{ij} — ширина общей грани полигонов Вороного, соответствующих узлам i и j .

Каждый из трех элементов уравнения (1) включает множество компонентов, отражающих разнообразные рельефообразующие процессы, при этом наиболее обширный список компонентов относится к флювиальной составляющей. Для оценки изменения высоты узла, обусловленного русловыми процессами необходимо установить параметры геометрии русла, интенсивности эрозии, транспортирующей способности потока, определить режим выпадения атмосферных осадков, а также ввести в модель ряд дополнительных параметров, набор которых зависит от моделируемой ситуации. Склоновая компонента включает меньшее число параметров, однако поиск допустимых значений коэффициента диффузии, как правило, оказывается нетривиальной задачей. Программа предполагает два механизма склоновой диффузии — линейный и нелинейный. В первом случае склоновый перенос принимается равномерным и определяется коэффициентом K_d и градиентом высоты между двумя узлами. В случае с нелинейной диффузией в схему добавляется критический градиент — значение уклона, по достижении которого скорость склонового переноса значительно увеличивается (данный механизм особенно актуален при моделировании эволюции горных ландшафтов). Основные формулы, управляющие моделированием экзогенных процессов, приведены в таблице 1; более подробное описание можно найти в работах [6, 7, 10].

Тектоническая составляющая уравнения (1) с точки зрения вычислений представляется наиболее простой — элементарный сценарий предполагает однородное поднятие или опускание всех узлов модели с заданной скоростью. Вместе с тем, функционал CHILD позволяет реконструировать более сложные тектонические ситуации, включая сдвиговые движения, складкообразование, формирование шарьяжей, при этом ряд широко распространенных геодинамических сценариев в оригинальной версии программы не рассматривается. Например, функционал CHILD исключает возможность моделирования блокового поднятия или опускания по разлому, угол падения которого отличается от 90° , при этом большинство сбросов и сбросо-сдвигов в БРС характеризуются значениями $50-70$. Таким образом, для корректной реконструкции развития горного обрамления байкальских впадин потребовалось создать новый тектонический сценарий.

Схема моделирования блокового поднятия по невертикальному разлому

В качестве основы для нового решения мы использовали оригинальный сценарий “Strike-slip”, т. е. сдвиг. Помимо поднятия/опускания, он предполагает разделение поверхности модели линией разлома на две части и горизонтальное смещение

одного блока относительно другого. При этом, если линия разлома проводится вдоль $Y = 0$, все узлы модели смещаются в боковом направлении (X) с заданной скоростью. Воспользовавшись этим обстоятельством, мы изменили вектор смещения ($X \rightarrow Y$), т.е. сетка начала двигаться не в сторону, а назад, по направлению к границе Y_{\max} . Параллельно с этим,

вдоль границы Y_{\min} сетка пополняется новыми узлами, которые обеспечивают расширение склона. В результате мы получаем симуляцию выхода плоскости разлома на дневную поверхность (рис. 3). Следует заметить, что в данном случае используется иррегулярная пространственная сетка, которая, в отличие от регулярной (рис. 2), позволяет модели более эффективно и реалистично строить пути стока.

Табл. 1. Ключевые формулы и параметры

Tab. 1. Key formulas and parameters

Категория	Основная формула	Элементы формулы	Ключевые значения
Сток ¹	$R_b = R - I_c$	R_b — интенсивность стока (м/год) R — интенсивность осадков (м/год) I_c — инфильтрация (м/год)	$R = 4,84$ $I_c = 0,0018$
Геометрия русла ²	$W = k_w Q^\omega$	W — ширина русла (м) k_w — коэффициент ширины русла Q — расход воды (м ³ /год) ω — экспонента	$k_w = 7$ $\omega = 0,5$
Флювиальная эрозия ³	$D_c = K_E (\tau_0 - \tau_{cr})$	D_c — эрозионная способность (м/год) K_E — коэффициент эрозии τ_0 — касательное напряжение (Па) τ_{cr} — критическое напряжение (Па)	$K_{Er} = 1,4 \cdot 10^{-5}$ $K_{Es} = 2,8 \cdot 10^{-5}$ $\tau_{cr(r)} = 35$ $\tau_{cr(s)} = 6,6$
Флювиальный перенос	$Q_c = K_f W_b (\tau_0 - \tau_{cr}) (\sqrt{\tau_0} - \sqrt{\tau_{cr}})$	Q_c — транспортирующая способность W_b — максимальная ширина русла K_f — транспортный коэффициент	$K_f = 3391$ $\tau_{cr(s)} = 6,6$
Склоновый перенос ⁴	$q_s = \frac{K_d S}{1 - (S / S_{cr})^2}$	q_s — твердый сток на ед. ширины K_d — коэффициент диффузии (м ² /год) S — локальный уклон S_{cr} — критический уклон	$K_d = 0,05$ $S_{cr} = 0,8$

¹ Интенсивность выпадения осадков соответствует средним значениям метеостанции «Баргузин»

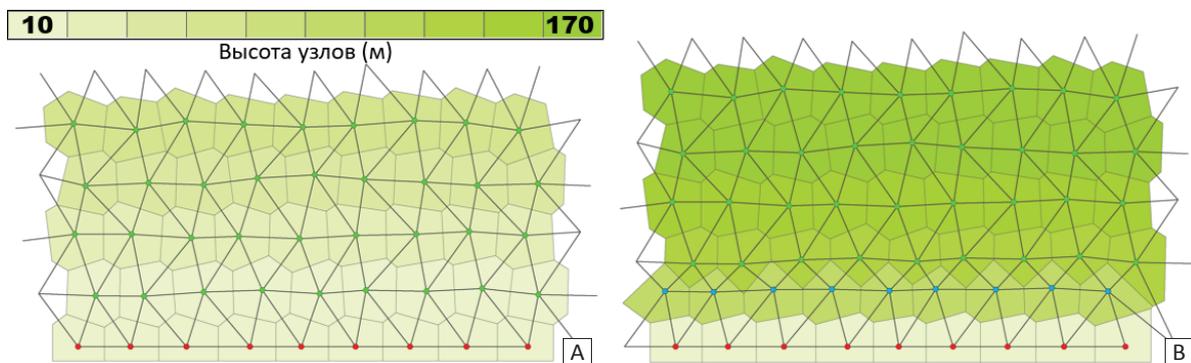
² Параметры русловой геометрии определялись по классической схеме Леопольда-Мэддока. Аналогично вычислялись коэффициенты глубины русла и шероховатости

³ Эрозионная способность определялась отдельно для коренных пород и реголитов

⁴ Здесь приведена формула нелинейной диффузии

Рис. 3. Схема моделирования блокового поднятия по невертикальному разлому

Fig. 3. Scheme of the modeling of uplift through non-vertical fault



A — рабочая область модели на момент начала поднятия, красными точками показаны узлы линии разлома; B — рабочая область после реализации поднятия со смещением: горизонтальное и вертикальное положение узлов линии разлома остаются неизменным, а в соседний ряд добавляются новые узлы (голубые точки)

A — framework before uplift (red points — fault nodes); B — framework after uplift with movement (red points — constant position, blue points — new nodes)

Моделирование позднекайнозойской эволюции приразломных склонов горного обрамления впадин БРС

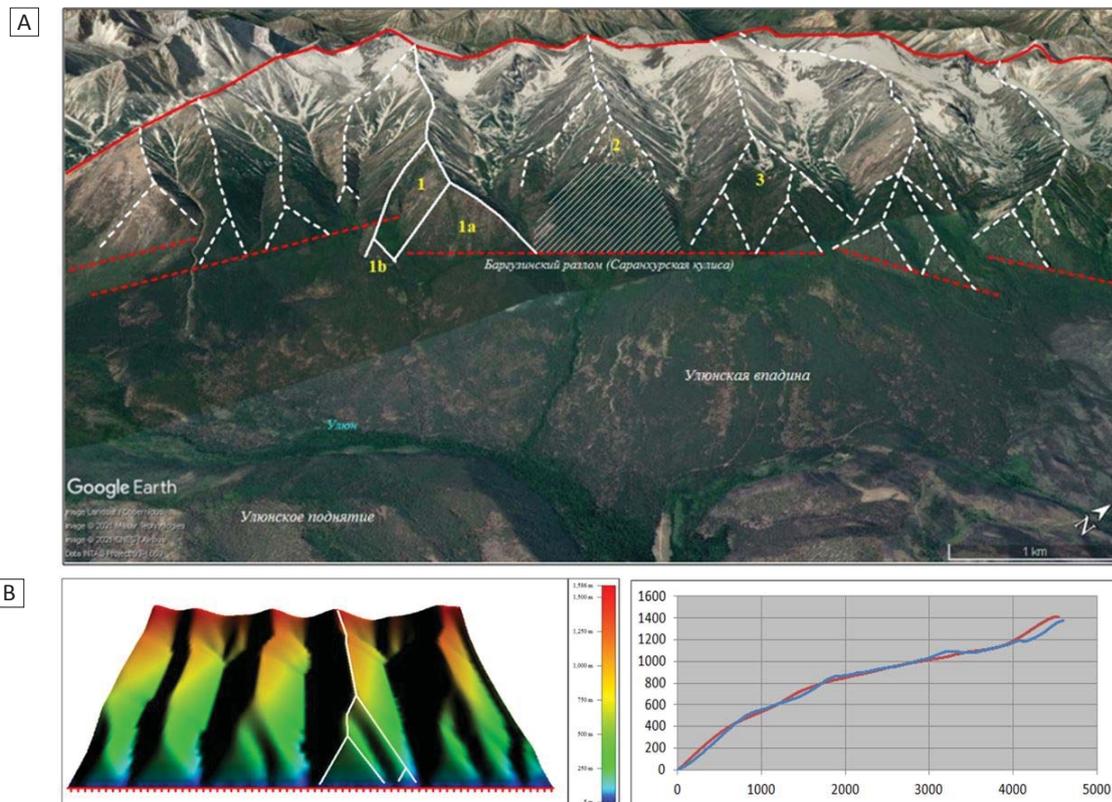
Адаптация программы к условиям сбросовой кинематики позволила провести реконструкцию развития отдельных сегментов горного обрамления байкальских впадин, соответствующих определенному морфотипу. Эксперимент проводился согласно предложенной гипотезе (см. выше). Это позволило ввести в модель следующее допущение: поскольку климатические параметры принимаются едиными во времени и пространстве, набор экзогенных параметров, объединяющий флювиальные и склоновые процессы, также устанавливается общим для всех выбранных сегментов (с учетом различий локальной геометрии). Таким образом, можно дать количественную оценку тектонической составляющей рельефообразования для объектов с неизвестными значениями скорости эндогенного поднятия. При этом определить неизвестный набор экзогенных параметров можно с помощью моделирования эволюции объекта с установленными тектоническими параметрами.

Таким объектом выступил сегмент Баргузинского хребта, ограничивающий с запада Улюнскую впадину-сателлит, для которого посредством тре-

кового датирования были определены аппроксимированные позднекайнозойские значения скорости поднятия (~0,4 мм/год) и возраста активизации (~5 млн. лет). Данный эскарпмент в значительной степени разрушен эрозией, но содержит одну сохранившуюся фасету, которая может выступать в роли индикатора позднекайнозойских рельефообразующих процессов; остальные водораздельные гребни эскарпмента следует рассматривать как артефакты. Таким образом, в эксперименте фактически реконструируется развитие одной мультиплицированной фасеты, т. е. область модели представляет собой чередование одинаковых водоразделов. Технически это реализуется в создании исходной пространственной сетки, имитирующей пологий склон со слабо врезаемыми долинами с интервалами, равными ширине фасеты. Определение набора экзогенных параметров проводилось двумя способами: путем вычисления на основании известных оценок для подобных объектов и эмпирически, путем подбора подходящих значений. Для оптимизации работы нами был создан калькулятор, позволяющий оперативно вычислять искомые параметры и генерировать текстовый файл задания. В результате серии экспериментов была построена модель развития эталонного объекта (рис. 4) с морфоме-

Рис. 4. Результаты реконструкции эталонного объекта Barguzin 1

Fig. 4. Results of reconstruction (etalon object Barguzin-1)



A — сегмент Баргузинского хребта в тылу Улюнской впадины, B — модель (на графике синим цветом показан реальный профиль водораздельного гребня, красным — модель)

A — escarpment Barguzin-1 (Barguzin ridge, Ulun basin); B — model (3D view and profile (blue line — real profile, red — model))

трическими параметрами (высота склона, высота и наклон фасеты), близкими к реальным значениям. Ключевые коэффициенты и значения, соответствующие оптимальному результату, приведены в таблице 1.

На втором этапе эксперимента полученный набор экзогенных параметров был применен для моделирования других объектов, расположенных в различных частях БРС. По аналогии с эталонным объектом были построены модели эволюции эскарпментов, приуроченных к хребтам Кодар, Северо- и Южно-Муйский, Баргузинский (Шаманская кулиса), Байкальский, Тункинским гольцам, а также Святоносскому поднятию. Скорости поднятия тестировались в диапазоне 0,2–1 мм/год. В результате серии экспериментов для каждого объекта была получена модель, наиболее близкая к реальному профилю. Было установлено, что средние позднекайнозойские скорости поднятия для блоковых структур горного обрамления впадин БРС варьируют в сравнительно узком диапазоне 0,3–0,5 мм/год; осредненное стандартное отклонение составило 6,5%. Полученные результаты демонстрируют хорошую корреляцию с оценками

[3, 6] и согласуются с представлениями о структурной асимметрии Байкальского рифта [4].

Заключение

Предложенная методика численного моделирования эволюции сбросовых эскарпментов, основанная на программе CHILD [10], в совокупности с комплексным морфотектоническим анализом, показала уверенные результаты и может быть использована при количественной оценке рельефообразующих процессов. Численные значения, полученные в ходе исследования, продемонстрировали, что средние позднекайнозойские скорости поднятия, характерные для плеч рифтовых впадин БРС, относительно невелики и варьируют в узком диапазоне 0,3–0,5 мм/год. Однако отдельные стадии или эпизодические события позднеорогенного этапа могут отличаться значительно более высокими значениями, и следующей задачей исследования ставится более дифференцированные реконструкции, включающие вариации тектонической активности и изменения климата.

Список источников

1. Бызов Л.М. Позднекайнозойские вертикальные движение горного обрамления впадин Байкальской рифтовой системы по данным численного моделирования : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Иркутск, 2022. – 15 с.
2. Воробьева Г.А., Мац В.Д., Шимараева М.К. Палеоклиматы позднего миоцена, плиоцена и эоплейстоцена Байкальского региона // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 38. – № 8. – С. 82–96.
3. Карта неотектоники северо-восточного сектора Азии / Институт земной коры СО РАН ; авт. К.Г. Леви. – 1 : 7 500 000. – Иркутск, 2008. – 1 к., 2 схемы.
4. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. – № 5. – С. 391–406.
5. 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 : СО РАН, 2001. – 252 с.
6. Attal M., Tucker G.E., Whittaker A.C., Cowie P.A., Roberts G.P. Modeling fluvial incision and transient landscape evolution: Influence of dynamic channel adjustment // Journal of Geophysical Research - Earth Surface. – 2008. – Vol. 113. – Iss. F3. – F03013. DOI: 10.1029/2007JF000893.
7. Bogaart P.W., Van Balen R.T., Kasse C., Vandenberghe J. Process-based modelling of fluvial system response to rapid climate change – I: model formulation and generic applications // Quaternary Science reviews. – 2003. – Vol. 22. – Iss. 20. – pp. 2077–2095. DOI: 10.1016/S0277-3791(03)00143-4.
8. Jolivet M., De Boisgrollier T., Petit C., Fournier M., San'kov V.A., Ringenbach J.-C., Byzov L.M., Miroshnichenko A.I., Kovalenko S.N., Anisimova S.V. How old is the Baikal rift zone? Insight from apatite fission track thermochronology // Tectonics. – 2009. – Vol. 28. – Iss. 3. – TC3008. DOI: 10.1029/2008TC002404.
9. Petit C., Meyer B., Gunnell Y., Jolivet M., San'kov V., Strak V., Gonga-Saholiariliva N. Height of faceted spurs, a proxy for determining long-term throw rates on normal faults: Evidence from the North Baikal Rift System, Siberia // Tectonics. – 2009. – Vol. 28. – Iss. 6. – TC6010. DOI: 10.1029/2009TC002555.
10. Tucker G.E. CHILD Users Guide for version R9.4.1 [Электронный ресурс] / Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES); Department of Geological Sciences University of Colorado. – Boulder, 2010. – 53 p. – Режим доступа: https://csdms.colorado.edu/csdms_wiki/images/Child_users_guide.pdf (дата обращения: 05.07.2023 г.).

References

1. Byzov L.M. Pozdnekainozoiskie vertikal'nye dvizhenie gornogo obramleniya vpadin Baikal'skoi riftovoi sistemy po dannym chislenogo modelirovaniya : avtoref. dis. ... kand. geol.-min. nauk [Late Cenozoic vertical movement of the mountain framing of the basins of the Baikal rift system according to numerical modeling: abstract of the dissertation for the degree of candidate of geological and mineralogical sciences]. Irkutsk; 2022. 15 p.
2. Vorob'eva G.A., Mats V.D., Shimaraeva M.K. Paleoklimaty pozdnego miotsena, plioTsena i ehopleistotsena Baikal'skogo regiona [Paleoclimates of the late Miocene, Pliocene and Eopleistocene of the Baikal region]. *Geologiya i geofizika*. 1995;38(8):82–96.
3. Levi K.G. Karta neotektoniki severo-vostochnogo sektora Azii [Map of the neotectonics of the northeastern sector of Asia]. 1 : 7 500 000. Irkutsk, 2008. 1 map, 2 schemes.
4. Logachev N.A. History and geodynamics of the Baikal rift. *Geologiya i geofizika*. 2003;44(5):391–406.

5. Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandel'baum M.M., Alakshin A.M., Pospeev A.V., Shimaraev M.N., Khlystov O.M. Kainozoi Baikal'skoi riftovoi vpadiny: stroenie i geologicheskaya istoriya [Cenozoic of the Baikal rift basin: structure and geological history]. Novosibirsk: SO RAN; 2001. 252 p.
6. Attal M., Tucker G.E., Whittaker A.C., Cowie P.A., Roberts G.P. Modeling fluvial incision and transient landscape evolution: Influence of dynamic channel adjustment. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*. 2008;113(F3):F03013. DOI: 10.1029/2007JF000893.
7. Bogaart P.W., Van Balen R.T., Kasse C., Vandenberghe J. Process-based modelling of fluvial system response to rapid climate change – I: model formulation and generic applications. *Quaternary Science reviews*. 2003;22(20):2077–2095. DOI: 10.1016/S0277-3791(03)00143-4.
8. Jolivet M., De Boisgrollier T., Petit C., Fournier M., San'kov V.A., Ringenbach J.-C., Byzov L.M., 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(3):TC3008. DOI: 10.1029/2008TC002404.
9. Petit C., Meyer B., Gunnell Y., Jolivet M., San'kov V., Strak V., Gonga-Saholiariliva N. Height of faceted spurs, a proxy for determining long-term throw rates on normal faults: Evidence from the North Baikal Rift System, Siberia. *Tectonics*. 2009;28(6):TC6010. DOI: 10.1029/2009TC002555.
10. Tucker G.E. CHILD Users Guide for version R9.4.1. Boulder, 2010. 53 p. Available at: https://csdms.colorado.edu/csdms_wiki/images/Child_users_guide.pdf (accessed 05.07.2023).

Статья поступила в редакцию 04.04.2023, одобрена после рецензирования 12.05.2023, принята к публикации 26.06.2023.
The article was submitted 04.04.2023; approved after reviewing 12.05.2023; accepted for publication 26.06.2023.

Информация об авторах

Бызов Леонид Михайлович

Кандидат геолого-минералогических наук
Ведущий инженер
Институт земной коры Сибирского отделения РАН
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128
e-mail: leo212002@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-6620-9056
SCOPUS: 57201738122

Саньков Владимир Анатольевич

Кандидат геолого-минералогических наук
Заместитель директора по науке,
заведующий лабораторией современной геодинамики
Институт земной коры Сибирского отделения РАН
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128
e-mail: sankov@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0002-1066-2601
SCOPUS: 57201738122

Кензин Максим Юрьевич

Научный сотрудник
Институт динамики систем и теории управления имени
В.М. Матросова Сибирского отделения РАН
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 134, а/я 292
e-mail: gorthauers@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7050-3154
SCOPUS: 57023864000

Ульянов Сергей Александрович

Кандидат технических наук
Ведущий научный сотрудник
Институт динамики систем и теории управления имени
В.М. Матросова Сибирского отделения РАН
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 134, а/я 292
e-mail: sau@icc.ru
ORCID: 0000-0002-8295-3352
SCOPUS: 35737939100

Information about authors

Leonid M. Byzov

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences
Lead Engineer
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontova str., Irkutsk, 664033, Russia
e-mail: leo212002@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-6620-9056
SCOPUS: 57201738122

Vladimir A. Sankov

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences
Deputy Director for Science,
Head of Modern Geodynamics Laboratory
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontova str., Irkutsk, 664033, Russia
e-mail: sankov@crust.irk.ru
ORCID: 0000-0002-1066-2601
SCOPUS: 57201738122

Maxim Yu. Kenzin

Researcher
Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS
134, Lermontova str., Irkutsk, 664033, Russia
e-mail: gorthauers@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7050-3154
SCOPUS: 57023864000

Sergey A. Ulyanov

Candidate of Technical Sciences
Lead Researcher
Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS
134, Lermontova str., Irkutsk, 664033, Russia
e-mail: sau@icc.ru
ORCID: 0000-0002-8295-3352
SCOPUS: 35737939100