



УДК 551.4.04 (571.53/.55)

Математическое моделирование эволюции рельефа сбросового уступа на примере Святоносского поднятия (Байкальская впадина)

Бызов Л. М. (leo212002@yandex.ru)

Саньков В. А. (sankov@crust.irk.ru)

Аннотация. В работе представлены результаты комплексного математического моделирования позднекайнозойской эволюции рельефа сбросовых уступов на примере Святоносского поднятия (Байкальская впадина). Моделирование выполнялось в программах CHILD и BFS, включающих параметры тектонических, флювиальных и склоновых процессов. Реконструкции показали высокую степень корреляции с реальным рельефом, что подтверждает состоятельность предложенного нами сценария эволюции. Также были выявлены некоторые особенности развития рельефа территории.

Ключевые слова: комплексное математическое моделирование, эволюция рельефа, сбросовый уступ, морфотектоника, Байкальский рифт, Святоносское поднятие.

Введение

Рельеф земной поверхности можно рассматривать как отражение воздействия на нее внешних и внутренних процессов. На размеры и форму рельефа влияют тектонические движения, физическое и химическое выветривание, флювиальные и склоновые процессы, антропогенное воздействие и многие другие факторы. Таким образом, в целях получения максимально полного представления о геоморфологическом строении той или иной территории необходимо рассматривать целый комплекс процессов, участвующих в его формировании. Для решения этой задачи в геоморфологии и геодинамике применяется метод комплексного математического моделирования. Суть его заключается в следующем. Интересующий участок суши или, к примеру, берегового склона принимается в виде пространственной сетки (если речь идет о трехмерных моделях) или двухмерного профиля. Каждый элемент сетки/профиля меняется во времени и пространстве под воздействием рельефообразующих процессов, выраженных в виде математических формул. Методика позволяет реконструировать рельеф, зная количественные параметры формирующих процессов, и напротив, владея информацией о рельефе, исследовать условия, его создавшие.

Математическое моделирование нельзя назвать принципиально новым методом, истоки идеи уходят к работе выдающегося американского геолога

Г. К. Гилберта, а большинство практических закономерностей и первые модели были получены во второй половине XX в. (Куллинг, Леопольд и Мэддок, Анхерт и др.). Революционным явлением для моделирования стало активное внедрение в геоморфологические исследования компьютерных технологий, что спровоцировало появление новых, до того времени невозможных, инструментов. Работы над созданием новых программ и подходов не прекращаются по настоящее время, при этом приветствуется кооперация усилий. В этой связи следует упомянуть сообщество CSDMS, созданное на базе Университета Колорадо и объединяющее исследователей со всего мира. Большинство методов, разработанных участниками сообщества, можно, с разрешения авторов, использовать в научных целях. Инструменты математического моделирования применяются для решения различных геоморфологических и геотектонических задач – например, для реконструкции флювиальных (работы М. Атгала, А. Виттакера, Д. Брауна) и склоновых (Дж. Роеринг, А. Мартин и М. Чёрч) процессов, сбросовых (К. Пети), складчато-надвиговых (С. Миллер) структур и т. д. Сегодня существует множество компьютерных программ, направленных на комплексное моделирование рельефа; некоторые из них созданы для решения конкретной задачи, другие отличаются универсальностью и многофункциональностью. Однако следует заметить, что, несмотря на стремительное развитие компьютерных технологий, степень объективности математического моделирования зависит прежде всего от объективности исходных данных. И в случаях, когда речь идет об эпохах продолжительностью в миллионы лет, добиться точности всех многочисленных параметров практически невозможно. Таким образом, задача математического моделирования в геоморфологии заключается не в стремлении реконструировать полный аналог реального рельефа, но воссоздать стиль его развития, определить ключевые параметры рельефообразующих процессов и количественно проверить состоятельность той или иной гипотезы.

Обзор методики

В своей работе мы использовали программы CHILD (Channel-Hillslope Integrated Landscape Development) и BFS (Bedrock Fault Scarp), разработанные Греггом Такером [8]. CHILD является одним из наиболее универсальных инструментов геоморфологических трехмерных реконструкций. Программа написана на языке C++ для платформы UNIX (также возможно ее использование в среде Windows через эмулятор Cygwin). Она создает трехмерное изображение земной поверхности для каждого момента времени (шаг задается пользователем). Собственными функциями визуализации программа не располагает, для этих целей применяются инструменты Surfer или MatLab. Принцип моделирования основан на методе конечных разностей. Управление программой осуществляется через вводный текстовый файл, содержащий свыше 150 параметров, которые прямо или опосредованно характеризуют свойства модели. Определение многих параметров требует сложных

поэтапных вычислений, с привлечением многочисленных дополнительных данных. Для этих целей нами был разработан оригинальный калькулятор на базе Microsoft Excel. В целом структуру CHILD можно представить в виде нескольких основных групп параметров: 1) климатические характеристики; 2) свойства коренного и осадочного материалов; 3) русловая геометрия; 4) русловые эрозионно-аккумулятивные процессы; 5) склоновый крип; 6) тектонический режим; 7) общие параметры сетки. Суть работы CHILD, как и любой подобной программы, можно представить в виде упрощенного выражения:

$$\Delta h(p)/\Delta t = U + E_f + E_d, \quad (1)$$

где $\Delta h(p)/\Delta t$ – изменение высоты h узла p за время t , U – изменение высоты за счет тектоники, E_f – изменение высоты за счет русловой эрозии, E_d – изменение высоты за счет склоновой диффузии. Каждый элемент данного уравнения может быть как положительным, так и отрицательным (например, тектоническое поднятие/опускание или эрозия/аккумуляция).

Несмотря на уникальную, в своем роде, многофункциональность, CHILD имеет ряд недостатков, потребовавших внесения некоторых корректив в ход исследования. В частности, при моделировании сбросового уступа невозможно изменить угол падения разлома, который по умолчанию составляет 90° . Таким образом, крылья сброса взаимно смещаются вдоль плоскости, перпендикулярной поверхности Земли, что может не соответствовать реальным условиям. Для решения этой проблемы была использована программа BFS, моделирующая изменения двухмерного профиля склона под воздействием эрозии и смещения по разлому с заданным углом падения. Использование BFS позволило скорректировать угол наклона тектогенных граней (фасет), а также рассчитать количественные значения склонового крипа.

Объект исследования

В качестве объекта моделирования было выбрано Святоносское поднятие, которое представляет собой составную (хоть и обособленную) часть междувпадинной перемычки, разделяющей Южно-Байкальскую и Северо-Байкальскую впадины, наряду с Ушканьим и Ольхонским горстами и горстом подводного Академического хребта [1]. Поднятие составляют три горста, кулисообразно сменяющие друг друга по простиранию; с востока его обрамляет широкая тектоническая ступень. Ступень перекрыта маломощным осадочным чехлом, и в центральной части он поднимается выше уровня Байкала, формируя Чивыркуйский перешеек (Мягкая Карга). Святоносское поднятие сложено разновозрастными магматическими (граниты, гранодиориты, сиениты) и метаморфическими (кристаллосланцы, гнейсы, мраморы) породами и частично перекрыто современными отложениями. Рельеф п-ва Святой Нос представлен высокими гольцовыми горами, максимальная отметка (1878 м над уровнем моря) приходится на южную кулису, центральная кулиса достигает высоты 1708 м, северная – 1639 м. Главная водораздельная поверхность полуострова в центральной его части представляет

собой сравнительно широкое плато, а к периферии приобретает черты острого гребня. Морфология отдельных сегментов поднятия существенно различается. Южная кулиса (большая ее часть) представлена крутыми уступами, треугольными фасетами и глубокими V-образными долинами временных водотоков; на крайнем юге, у м. Нижнее Изголовье, высота и протяженность склонов значительно уменьшается, фасеты пропадают, а долины приобретают черты ручейковых водотоков. Склоны северной и центральной кулис отличаются большей протяженностью и, как следствие, более сложной дренажной сетью. Единого фронта фасет здесь не прослеживается, и рельеф характеризуется высокой степенью расчлененности. В береговой зоне большей части полуострова распространены озерные террасы.

Непосредственным объектом моделирования явился восточный склон южной части Святоносского поднятия (рис. 1).

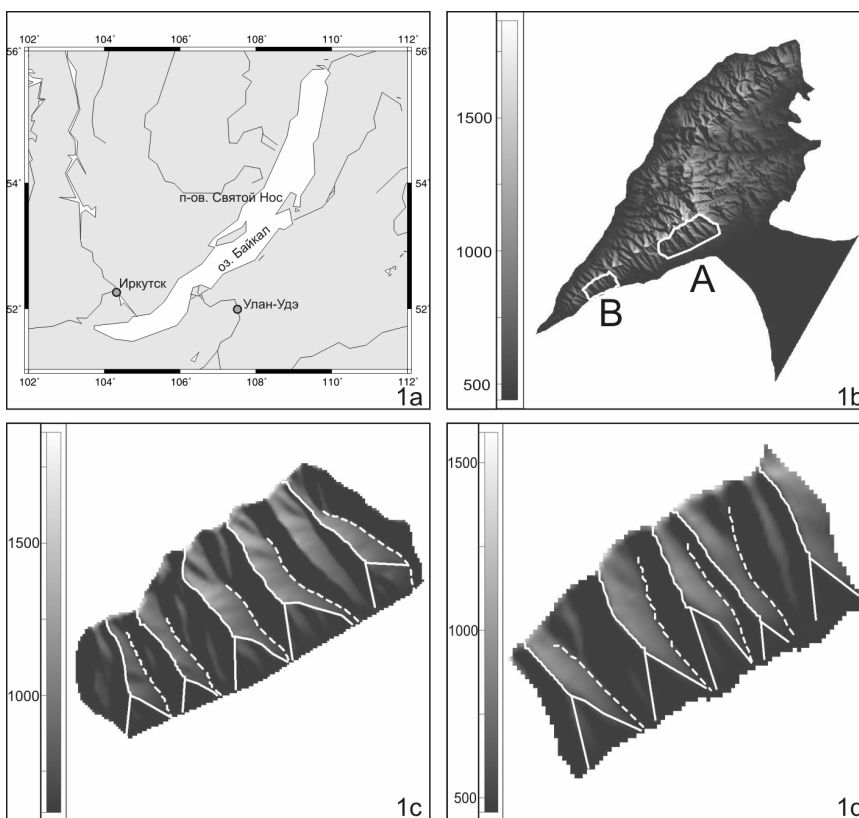


Рис. 1. Объект исследования: 1, а – обзорная карта Прибайкалья; 1, б – п-в Святой Нос (по данным SRTM); белыми линиями обозначены границы моделируемых объектов; 1, с и 1, д – сегменты А и В соответственно (сплошными линиями показаны водоразделы, прерывистыми – русла временных водотоков)

В морфотектоническом отношении это сбросовый уступ, представленный рядом тектогенных граней (фасет и антифасет). Длина и высота склона, высота и уклон фасет на всем протяжении уступа неодинаковы – северная часть отличается большей высотой и длиной склона, а также глубиной вреза речных долин. Морфология тектонических уступов (в частности, треугольных фасет) может служить важным индикатором геодинамических процессов. Исследованием морфотектоники сбросовых уступов в Байкальской рифтовой системе (БРС) занимался Г. Ф. Уфимцев, подробно описавший структуру и процесс формирования тектогенных граней [3]. В своей работе мы подходим к данной проблеме с другой стороны, пытаемся дать количественную оценку эволюции сбросового уступа с помощью математического моделирования. Подобные эксперименты уже проводились. Большое влияние на наши исследования оказали работы К. Пети, посвященные моделированию эволюции рельефа Прибайкалья [5] и Провинции Бассейнов и Хребтов [4], а также исследования М. Атталя по сбросовым уступам Аппенин [7]. Однако целью нашего эксперимента является попытка получить комплексную картину позднекайнозойского развития ландшафта с учетом максимально возможного количества факторов.

Условия моделирования

Технические особенности CHLD таковы, что пространственная неоднородность морфологии и вещественного состава Святоносского поднятия (даже в пределах одного склона) не позволяет воссоздать эволюцию всей структуры в рамках одного эксперимента. В этом случае неизбежны ошибки в реконструкции стока, эрозионно-аккумулятивных процессов, склонового крипа, поэтому для успешного моделирования необходимо разбить дискретную структуру на относительно однородные сегменты. В нашем исследовании были выбраны два участка восточного склона южной части Святого Носа (см. рис. 1, *b*). Они различаются размерами, морфологией и составом слагающих пород, обладая при этом общими свойствами, характерными для сбросовых уступов. В ходе изучения был протестирован ряд количественных моделей эволюции этих сегментов. Результатом эксперимента явились две реконструкции, отражающие возможный сценарий развития объекта на неотектоническом этапе. Далее приведены ключевые вводные параметры для моделей, а также основные формулы и закономерности, используемые в эксперименте.

Модель А отражает свойства одноименного сегмента (см. рис. 1, *c*). В качестве исходной поверхности рассматривается прямоугольная ровная наклоненная (3°) сетка 3500×7000 м с размером ячейки 100×100 м (выбор обусловлен размером пикселя в моделях SRTM). Модель охватывает период с позднего плиоцена (3,5 млн лет) по настоящее время, что соответствует наиболее активной фазе неотектонического этапа в БРС [2]. До начала активизации поднятия территория долгое время находилась в условиях тектонического затишья, о чем косвенно свидетельствуют данные трекового датирования по апатитам, полученные нами для Баргузинского хребта [6]. Это

объясняет небольшой уклон и сглаженность исходной поверхности, поскольку эрозионные процессы, при практическом отсутствии поднятия, привели к денудации склона. Скорость тектонического поднятия в модели составляет 0,4 мм/год [1].

Климатические условия (интенсивность выпадения осадков, продолжительность и частота событий) рассчитывались по современным данным метеостанции «Баргузин» с условием, что они соответствуют средним за рассматриваемый период. Предпосылкой для такого допущения стали палеоклиматические реконструкции, согласно которым климат Прибайкалья варьировал от теплого субтропического (как аридного, так и влажного) до холодного климата тундры и ледниковых зон [2]. Таким образом, современный климат региона, характерный для таежно-степной зоны, можно условно рассматривать как среднестатистический.

В качестве слагающего материала в модели принимается среднезернистый гранит с размером отдельностей 5 см [7] и критическим сдвиговым напряжением 36 и 14 Па (для коренной породы и реголита соответственно). Формирование стока определяется правилом Хортонa, согласно которому сток начинается без избыточного накопления, что характерно для склонов с тонким реголитовым слоем. Геометрия потока в модели подчиняется законам классической русловой геометрии Леопольда – Мэддока.

Эрозионно-аккумулятивные процессы управляются уравнениями эрозионной (2) и транспортной (3) способности:

$$E = K_e (\tau - \tau_{cr})^\alpha, \quad (2)$$

где E – интенсивность эрозии (м/год), K_e – коэффициент эрозии (зависит от свойств породы), τ и τ_{cr} – касательное и критическое сдвиговое напряжение (Па), α – показатель степени, зависящий от выбора единиц измерения:

$$T = K_t W (\tau - \tau_{cr}) (\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_{cr}}), \quad (3)$$

где T – транспортная способность (м/год), K_t – коэффициент переноса (зависит от свойств породы), W – ширина потока (м).

Склоновые эрозионно-аккумулятивные процессы, не связанные с формированием русла, определяются уравнением нелинейной диффузии (4):

$$q_c = \frac{K_d \nabla z}{1 - (|\nabla z|/S_c)^2}, \quad (4)$$

где q_c – твердый сток на единицу ширины (м³/год), K_d – коэффициент диффузии (м²/год), ∇z – локальный уклон, S_c – критический локальный уклон, по достижении которого крип значительно увеличивается. Коэффициент диффузии зависит от плотности породы, скорости выветривания и интенсивности плоскостной эрозии. Для вычисления последнего параметра ис-

пользовалась программа BFS. В результате получено значение $K_d = 0,045$, что в целом согласуется с другими оценками для этого региона [5].

Модель В соответствует одноименному сегменту (см. рис. 1, *d*). Она отличается от предыдущей размерами, литологическим составом и скоростью поднятия, что, по-видимому, предопределило морфологические различия. Сетка ограничена размерами 2000×5000 м, слагающий материал представлен метаморфическими породами (кристаллосланцы, мраморы), скорость поднятия составляет 0,6 мм/год. Выбор последнего параметра обусловлен тем, что скорость опускания висячего крыла сброса на сегменте В значительно больше, чем на сегменте А. Это показывает анализ батиметрии Баргузинского залива оз. Байкал. В связи с этим мы предположили, что скорость противоположного поднятия также должна быть выше. Заметим, что оба варианта скорости не являются однозначно установленными величинами, и одной из задач эксперимента являлось тестирование данных параметров на состоятельность. Литологические различия обусловили иные значения коэффициентов эрозии, флювиального переноса и диффузии – к примеру, коэффициент диффузии для кристаллосланцев составил $0,04 \text{ м}^2/\text{год}$. Изменение длины склона также внесло существенные коррективы в русловую геометрию, механизм формирования стока, эрозионно-аккумулятивные процессы.

Анализ и обсуждение

Полученные результаты визуализированы в виде трехмерных моделей и двухмерных графиков. 3D-модели (2, *a*; 3, *a*) отображают морфологию объекта на последней стадии эксперимента, т. е. соответствуют современному рельефу. Графики (2, *d, e*; 3, *d, e*) показывают сравнение реального рельефа, полученного из данных SRTM и реконструированного (изображены осредненные структурные линии водоразделов и долин временных водотоков). На графиках (2, *b, c*; 3, *b, c*) отражена воссозданная эволюция этих линий.

Трехмерные модели и сравнительные графики демонстрируют внешнюю схожесть с реальным рельефом. Для обоих графиков водоразделов наблюдается определенное несогласие в нижней части профиля, приходящейся на фасету. Это можно объяснить несоответствием угла падения разлома: как уже упоминалось, в модели разлом строго вертикален, но в реальных условиях угол составляет $\sim 60^\circ$. Заметим, что вычисления в программе BFS с использованием тех же параметров скорости поднятия и склонового крипа, но с измененным углом падения разлома дали угол наклона тектогенной грани, близкий к реальному. Сравнительный график русла для сегмента А показывает практически полное соответствие, за исключением небольшого несогласия в верхней части профиля, что можно отнести к допустимой погрешности. График для сегмента В показывает, что в модели долина характеризуется большим врезом, нежели он есть в природе. Мы объясняем этот факт сложностью литологического строения данного объекта.

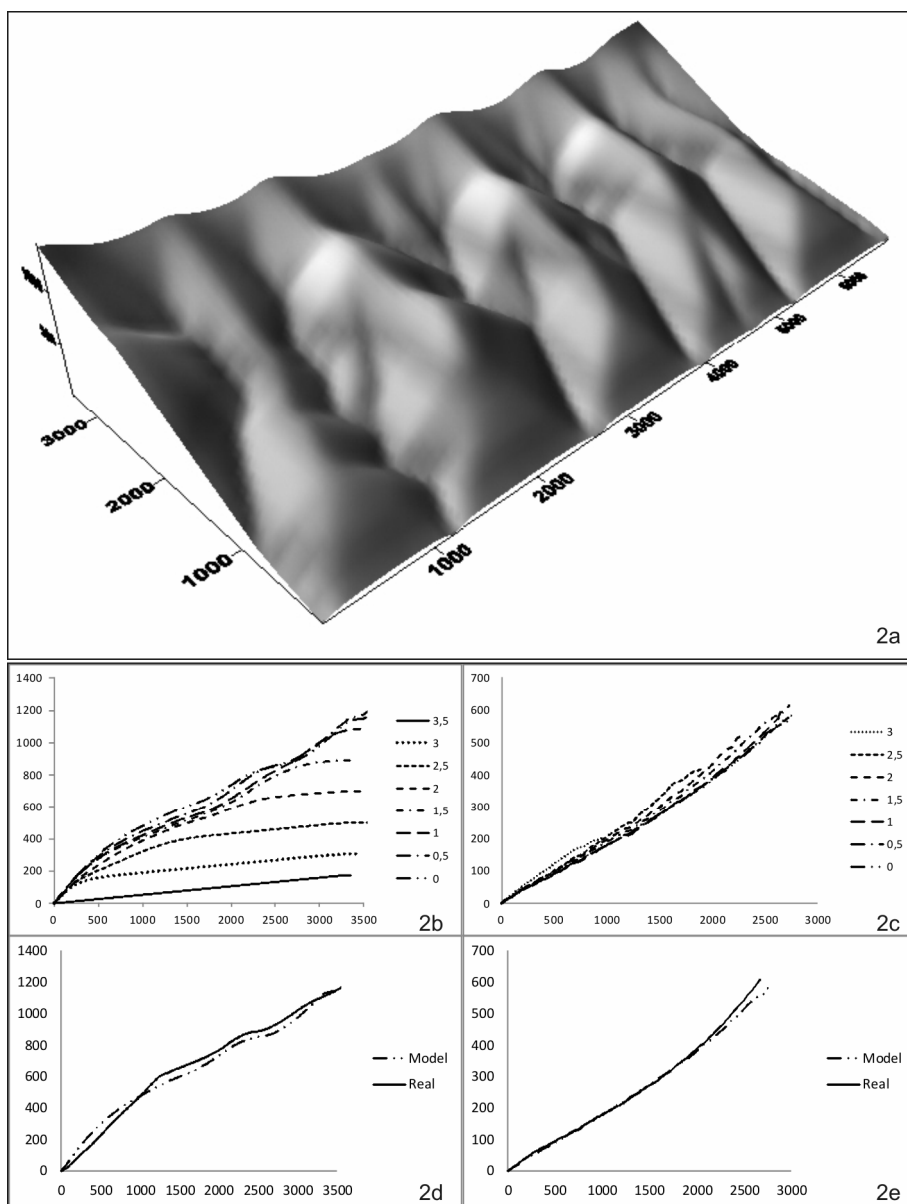


Рис. 2. Результаты моделирования сегмента А:
 2, а – трехмерная модель рельефа (современная стадия); 2, b и 2, c – средние графики эволюции водоразделов и русел соответственно (временной шаг – 0,5 млн лет); 2, d и 2, e – сравнение реального и реконструированного рельефа (2, d – водоразделы, 2, e – русла)

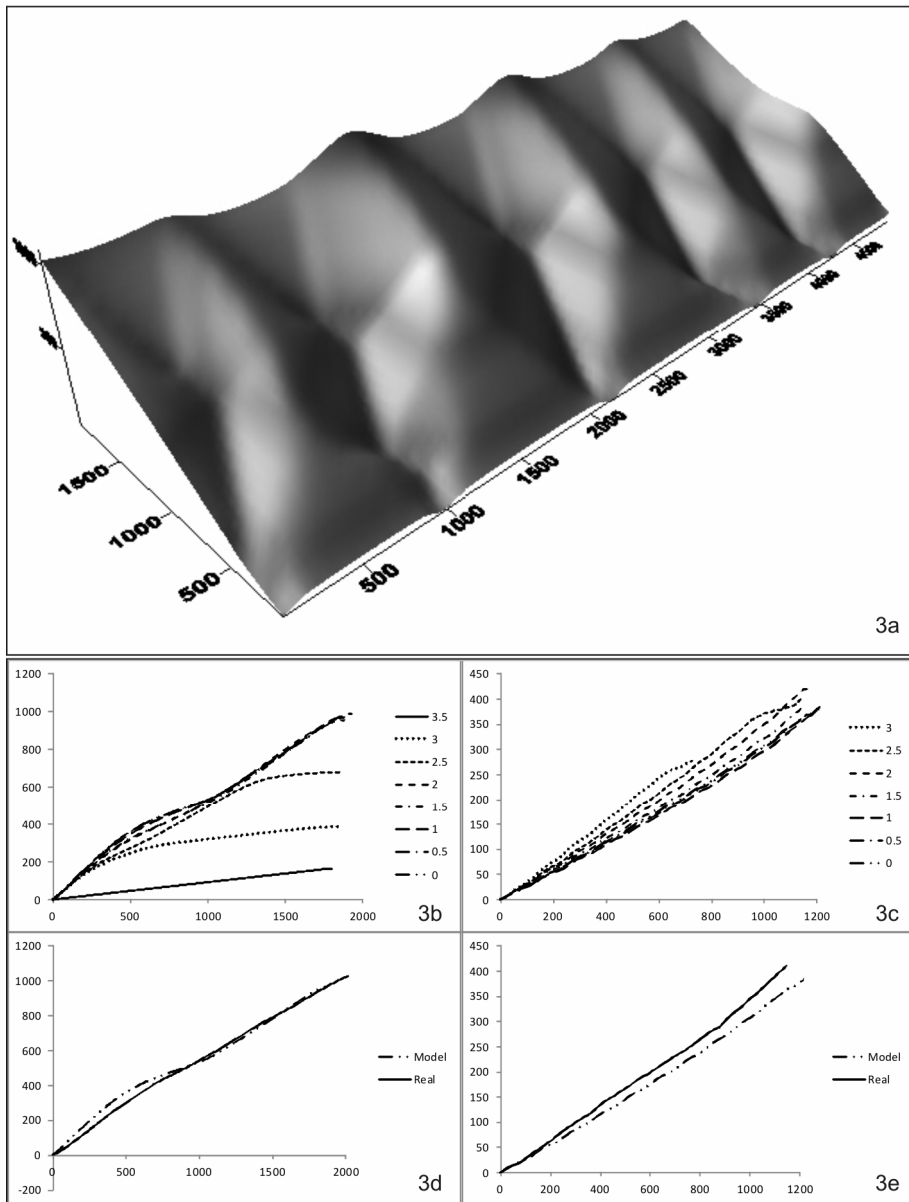


Рис. 3. Результаты моделирования сегмента В:
 3, *a* – трехмерная модель рельефа (современная стадия); 3, *b* и 3, *c* – средние графики эволюции водоразделов и русел соответственно (временной шаг – 0,5 млн лет 3, *d* и 3, *e* – сравнение реального и реконструированного рельефа (2, *d* – водоразделы, 2, *e* – русла)

В отличие от сегмента А, сложенного однородными (и, следовательно, равномерно эродируемыми) гранитами, разнородные метаморфиты сегмента В разрушаются более сложно. Флювиальная эрозия сталкивается как с разнообразием вещественного состава, так и с особенностями залегания пород. Но в данной модели мы не учитывали детали литологического строения этого сегмента, унифицировав его до однородного материала.

Эволюция водоразделов в моделях А и В существенно различается. В модели А интенсивный рост склона продолжается 2,5 млн лет, после чего наступает относительная стабильность, когда поднятие почти полностью нивелируется за счет эрозии. В модели В равновесное состояние достигается через 1,5 млн лет. В обоих случаях склон становится стабильным по достижении максимальной длины русла. Заметим, что этот баланс непостоянен: если эксперимент продлить, эрозия начинает преобладать над поднятием, и склон разрушается. Таким образом, можно сделать вывод, что современное состояние исследуемых объектов является относительно стабильным.

Выводы

В результате проделанной работы были получены комплексные математические модели позднекайнозойской эволюции рельефа отдельных участков сбросового уступа Святоносского поднятия. Они показали высокую степень корреляции с реальными цифровыми моделями современного рельефа, что позволяет говорить о состоятельности предложенного сценария, несмотря на некоторые отклонения. Их наличие связано не только с техническими недостатками методики, которые могут быть исправлены, но также с анизотропией природных процессов и явлений, которую не всегда можно учесть в рамках математической модели. Эксперименты продемонстрировали не только согласованность реальной и моделируемой поверхностей на конечном этапе, но также некоторые особенности развития рельефа на более ранних стадиях. В частности, было установлено, что исследуемые склоны в настоящее время находятся в стабильном состоянии.

Методика математического моделирования открывает новые перспективы для геоморфологических и геодинамических исследований в БРС. Мы ставим перед собой задачу увеличения количества моделируемых объектов, что позволит проводить полномасштабный сравнительный анализ. Также необходимы привлечение и разработка новых методов и инструментов, способных решать задачи за границами возможностей CHILД.

Авторы выражают благодарность Г. Такеру, М. Атталю, К. Пети и Дж. Брауну за предоставленные методики и ценные советы.

Работа выполнена при поддержке Проекта РАН ОНЗ 7.7

Список литературы

1. Изучение кинематики разломов центральной части Байкальского рифта с применением комплекса радиогеодезических и геолого-геофизических методов / В. А. Саньков [и др.] // Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой. Улан-Удэ, 6–10 сент. 2010 : сб. докл. Рос. науч. конф. – М. : ИРЭ им. Котельникова РАН, 2010. – С. 531–538.

2. *Мац В. Д.* Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: Строение и геологическая история / В. Д. Мац, Г. Ф. Уфимцев, М. М. Мандельбаум. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. – 252 с.

3. *Уфимцев Г. Ф.* Морфотектоника Байкальской рифтовой зоны / Г. Ф. Уфимцев – Новосибирск : Наука, 1992. – 216 с.

4. Faceted spurs at normal fault scarps: insights from numerical modeling / C. Petit [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. – 2009. – Vol. 114, B05403. – P. 1–13.

5. Height of faceted spurs, a proxy for determining long-term throw rates on normal faults: insights from the North Baikal Rift System, Siberia / C. Petit [et al.] // *Tectonics*. – 2009. – Vol. 28, TC6010. – P. 1–12.

6. How old is the Baikal Rift Zone? Insight from apatite fission track thermochronology / M. Jolivet [et al.] // *Tectonics*. – 2009. – Vol. 28, TC3008. – P. 1–21.

7. New constraints on sediment-flux-dependent river incision: Implications for extracting tectonic signals from river profiles / M. Attal [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. – 2008. – Vol. 113, F03013. – P. 1–16.

8. *Tucker G. E.* CHILD Users Guide for version R9.4.1 / G. E. Tucker. – Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES) and Department of Geological Sciences University of Colorado, Boulder, CO 80309 USA, 2010. – 52 p.

Numerical Modeling of Landscape Evolution of Normal-Fault Scarp by the Example of Svyatoy Nos Upland

L. M. Byzov, V. A. Sankov

Abstract. We present results of complex numerical modeling of Late-Cenozoic landscape evolution of normal-fault scarps by the example of Svyatoy Nos Upland (Baikal Basin). For modeling we used the programs CHILD and BFS (by Greg Tucker) including algorithms of tectonical, fluvial and hillslope processes. Models showed the good correlation with real relief. These results confirm consistency of evolution's scenario which we suggested. Also we defined some features of relief development of territory.

Keywords: complex numerical modeling, normal-fault scarp, CHILD, landscape evolution, Baikal rift, Svyatoy Nos Upland.

*Бызов Леонид Михайлович
главный специалист подразделения,
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел: (3952)42-95-34*

*Byzov Leonid Mikhailovich
Chief Specialist
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel: (3952)42-95-34*

*Саньков Владимир Анатольевич
кандидат геолого-минералогических наук,
зав. лабораторией; зав. кафедрой
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952) 42-79-03
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1*

*Sankov Vladimir Anatolievich
Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Head of Laboratory;
Head of Department
Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel: (3952) 42-79-03
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664033*