

УДК 551.4.013:551.4.037

© 2014 г. В.Вад. БРОНГУЛЕЕВ

**КИНЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЛИТОГЕННЫХ
ФОРМ РЕЛЬЕФА****Введение**

Избирательная денудация играет большую роль в формировании скульптурных особенностей рельефа. Влиянию литологических неоднородностей на форму склонов посвящены многочисленные работы. Еще В. Пенк рассматривал образование уступа на склоне, пересеченного прочной вертикальной дайкой, параллельной простиранию склона [1]. Математическое описание формы такой дайки для разных вариантов ее положения на склоне приводится в работе [2]. Также описаны интересные случаи инверсии долин с бронированным днищем, превратившихся в положительные формы [3]. В последние десятилетия широкое распространение получили разнообразные модели эволюции рельефа, во многих из которых используется условие неоднородности субстрата. Выполнено моделирование эволюции рельефа на участке водораздела рек Замбези и Лимпопо в южном Зимбабве и показано, как происходит формирование нескольких уровней планации, приуроченных к территориям с различной литологией и не связанных с последовательностью тектонических импульсов поднятия [4]. Моделируется развитие педиментов на литологически неоднородном субстрате, с учетом того, что скорость выветривания коренных пород зависит от меняющейся мощности реголита [5]. Эта модель включает в себя множество параметров, таких, как инфильтрационные свойства реголита, количество осадков и т.п.

Нами была предложена простая кинематическая модель развития склона, в которой скорость перемещения его поверхности считается зависящей от морфологических параметров склона и скорости тектонических деформаций – внешнего фактора [6, 7]. Напомним, что, если динамические модели позволяют определить скорость снижения склона при знании не только его морфологии, но и многих характеристик субстрата и ландшафтно-климатических условий, то кинематические модели позволяют определить, как будет развиваться склон при условии, что известна скорость его снижения – для каких-то конкретных значений морфологических параметров. Свойства субстрата и внешних условий, для определения которых часто используются измерения самих скоростей перемещения поверхности, в кинематических моделях не нужны, что делает их использование значительно проще.

Ранее с помощью предложенной кинематической модели были продемонстрированы некоторые характерные особенности морфологии склонов, возникающие в результате пульсационных тектонических поднятий, тектонических деформаций разной кинематики как при раздельном действии тектоники и экзогенных процессов, так и при одновременном [6–8]. Во всех этих случаях рассматривался склон, сложенный однородным субстратом с одинаковой скоростью разрушения во всех точках. В данной работе мы приняли во внимание литологический фактор и рассматриваем развитие склона, сложенного породами различной прочности, т.е. склона, скорость

разрушения которого меняется по разрезу в вертикальном или горизонтальном направлении.

Модель. При выводе кинематического уравнения эволюции склона, предполагалось, что скорость отступления склона по нормали к его поверхности складывается из трех составляющих: одна из них пропорциональна синусу угла наклона склона¹, другая пропорциональна вертикальной кривизне (денудация на выпуклых и аккумуляция на вогнутых в профиле участках) и третья – плановой кривизне (например, более быстрое разрушение гребней и аккумуляция в ложбинах). Эти предположения привели к уравнению следующего вида:

$$\partial h / \partial t = -A |grad h| + BK_{\text{вер}} \sqrt{1 + |grad h|^2} - CK_{\text{гор}} \sqrt{1 + |grad h|^2} + f(x, y, t). \quad (1)$$

Здесь $\partial h / \partial t$ – скорость перемещения поверхности склона по вертикали (снижению соответствуют отрицательные значения), $|grad h|$ – абсолютная величина градиента поверхности, $K_{\text{вер}}$ – вертикальная кривизна, положительная на вогнутых и отрицательная на выпуклых склонах, $K_{\text{гор}}$ – горизонтальная кривизна, положительная на гребнях и отрицательная в ложбинах, $f(x, y, t)$ – скорость тектонических движений. Коэффициенты A , B и C (имеющие размерность скорости) задают скорости снижения поверхности, соответствующие трем указанным компонентам. Например, если принять, что $A = 1$ мм/год, а $B = 0$ и $C = 0$, то это означает, что склон крутизной 45° отступает параллельно самому себе, снижаясь со скоростью 1 мм/год². Коэффициент B положителен, поскольку выпуклый склон, очевидно, разрушается быстрее вогнутого. Но коэффициент C может быть как положительным, так и отрицательным. Знак плюс соответствует сделанному выше допущению о более быстром разрушении гребней, знак минус, напротив, отвечает случаю, когда снижение гребней замедлено отсутствием стока на них, а ложбины углубляются водотоком. Поскольку в данной модели не описываются эрозионные процессы, то в дальнейшем этот последний случай не рассматривается.

Постоянство коэффициентов на всем склоне соответствует однородному субстрату. Если склон сложен породами различной устойчивости, то малые значения коэффициентов должны соответствовать прочным породам, большие – легко разрушающимся. Так, если на склоне обнажаются горизонтально залегающие слои разной прочности, то коэффициенты будут принимать различные значения в соответствующих интервалах высот h . Например, условие: “ $A = 1$ если $h_1 < h < h_2$ и $A = 2$ в остальных случаях” означает, что в интервале высот $h_1 \div h_2$ залегает слой, разрушающийся в два раза медленнее, чем остальной склон. Если прочность пород, слагающих склон, меняется в горизонтальном направлении, то различные значения каждого из коэффициентов будут приурочены к различным интервалам координат x и y . Все эти условия для коэффициентов легко задаются непосредственно в расчетной программе.

Несколько сложнее дело обстоит, если включить в модель тектонические движения ($f(x, y, t) \neq 0$). Тогда высота или плановое положение границ слоев с разной прочностью будут меняться со временем, и в соответствующие условия для коэффициентов войдет переменная t . В данной работе мы ограничимся рассмотрением случаев без участия тектонических движений.

Результаты моделирования. Литологическая ступенчатость прямого склона. Рассмотрим, прежде всего, простой склон с постоянными падением и простиранением,

¹ Обоснованность такого допущения отмечалась ранее А.М. Трофимовым и В.М. Москвинным [9]. При этом скорость отступления склона пропорциональна силе, сдвигающей или скалывающей частицы вниз по склону.

² Такое условие определит и соотношение пространственных и временных единиц модели. Если, например, считать, что единица по оси z равна 1 м, то единица времени составит 1000 лет.

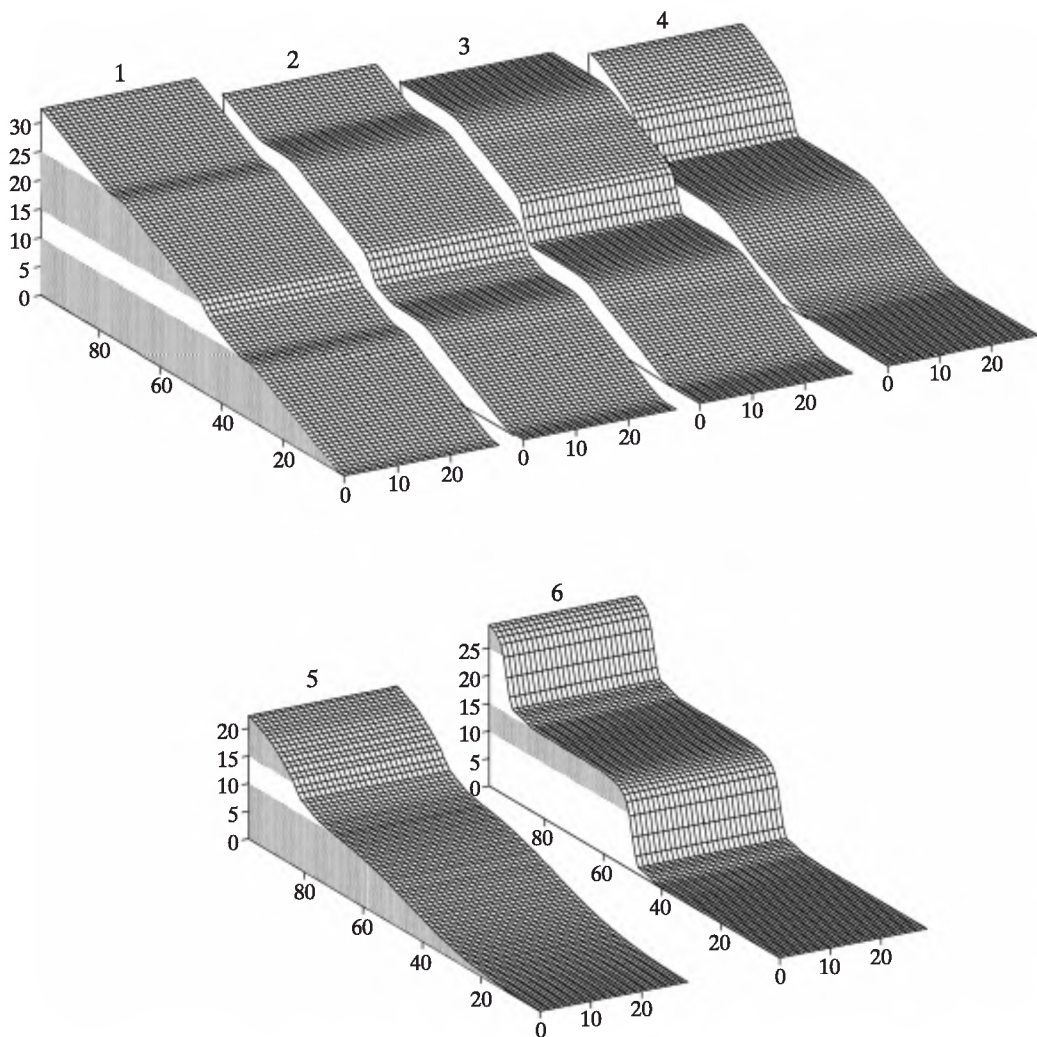


Рис. 1. Литологические ступени, образованные горизонтальными слоями различной прочности: $A = 1$ и $A = 3$. Более прочные ($A = 1$) показаны темным цветом на боковых гранях

1–4 – стадии развития, соответствующие моментам $t = 2, 5, 10, 28$, при условии $B = 0$ и $C = 0$; 5 – аналог 4, при $B = 2$ и $B = 6$ для прочных и слабых слоев, соответственно; 6 – склон к моменту $t = 15$ для обратного соотношения прочности слоев (коэффициентов A)

имеющий уклон около 20° и размер основания 100 единиц по оси y и 30 – по оси x . Базис эрозии поддерживается на постоянном уровне: $h = 0$ при $y = 0$. Пусть в интервалах высот 0–10 и 15–25 залегают более прочные слои, чем в остальных интервалах. Положим, например, что коэффициент A в этих слоях равен 1, а в остальных – 3. Допустим, что происходит только параллельное отступление склона, так что коэффициент B равен 0. Поскольку склон в плане прямолинеен, то коэффициент C также можно положить равным 0³. На рис. 1 показано, как будет развиваться этот склон при таких условиях. Мы видим, что с самого начала (стадия 1) на уровне менее прочных пород в интервале высот 10–15 возникает углубление в склоне, состоящее из горизонтальной

³ Далее в тексте и в подписях к рисункам коэффициенты, равные 0, как правило, не упоминаются.

площадки на нижней границе слабого слоя, крутого уступа под его верхней границей и соединяющего их наклонного участка, сохраняющего первичный уклон. По мере развития процесса горизонтальная площадка расширяется, уступ приобретает большую крутизну и высоту, а центральный наклонный участок сокращается (стадия 2) и в какой-то момент исчезает, так что на склоне образуется ступень (стадии 3 и 4). Самая верхняя, относительно непрочная часть склона отступает по поверхности прочного слоя и может быть полностью срезана при ее небольших размерах (стадия 3). В основании склона также образуется горизонтальная площадка, которая расширяется медленнее, чем верхняя, поскольку нижняя часть склона сложена более прочными породами. Все эти горизонтальные (или субгоризонтальные, так как снижение происходит и на поверхности твердых слоев) ступени, в сущности, являются педиментами. При параллельном отступании склона, если обеспечено удаление накапливающегося у подножия рыхлого материала, педимент подножия возникает при любой прочности пород, которая и определяет скорость его расширения. Но педименты в средней и в верхней частях склона, осложняющие первоначально прямой его профиль, порождают литологической неоднородностью разреза.

Если развитие склона происходит не только путем параллельного отступания, но и при участии течения грунта, подчиняющегося диффузионному закону (коэффициент $B \neq 0$), то описанные выше преобразования склона будут выражены менее четко. Так, например, если коэффициент B задать в два раза большим, чем A , т.е. равным 2 и 6 в прочных и слабых частях склона, соответственно, то в момент времени, соответствующий стадии 4, получится результат, показанный на рис. 1(5). Сравнив его с рис. 1(4), можно увидеть, что все перегибы склона оказываются сильно сглаженными и его профиль более выровненным, чем в первом случае.

Наконец, на рис. 1(6) показан (для $t = 15$) такой же склон, но у которого прочные и слабые слои поменялись местами. Если в первом случае в узких интервалах высот (10–15 и выше 25) залежали относительно быстро разрушающиеся породы, то здесь в этих интервалах залегают прочные слои, а слабые занимают широкие интервалы 0–10 и 15–25. Как и ранее, образуется ступенчатый склон, хотя выглядит он совершенно иначе (ступени имеют большую высоту и глубину) и разрушается в целом быстрее – в соответствии с большей мощностью слабых слоев.

Естественно, что для образования хорошо выраженной ступенчатости склонов и горизонтальных поверхностей у их подножия необходимо удаление материала, сносимого с вышележащих частей склонов. При параллельном отступании склона и $B = 0$ это условие в модели выполняется автоматически, что мы считаем вполне допустимым, поскольку возможность такого удаления признается в большинстве исследований, посвященных педиментам [10], и не вызывает сомнений применительно к сравнительно узким ступеням.

Поперечный проход или седловина. Рассмотрим теперь случай, когда ослабленный слой располагается не горизонтально, а вертикально. Такой слой может существовать в складчатой толще или соответствовать зоне дробления пород, например, по разлому. С подобными зонами часто бывают связаны понижения типа седловин или горных проходов [11]. Если в плане такая зона прямолинейна, то, как уже говорилось, она задается пониженными значениями коэффициентов в каком-то интервале значений горизонтальной оси x . Мы приняли это условие таким: коэффициент $A = 2.3$ в интервале $12 < x < 16$ и $A = 1$ в остальных случаях. Начальная форма склона – та же, что и в предыдущем варианте. Рис. 2 (1–3) показывает последовательные стадии развития такого склона. Вначале возникает прямолинейная ложбина, которая постепенно углубляется и, по мере того, как горизонтальное днище ее проникает в глубину склона, расширяется благодаря отступанию боковых стенок, формируя подобие горного прохода. На стадии 2 это плоское днище доходит примерно до середины ширины склона, на стадии 3 – прорезает весь склон, а сам проход приобретает широкое “устье”. Одновременно с развитием прохода, в других частях склона у его подножия формирует-

ся площадка педимента, ширина которой определяется скоростью отступления склона, т.е. величиной коэффициента A вне интервала $12 < x < 16$.

Примеры форм, возникающих подобным образом более чем многочисленны. На рис. 3 показана расширяющаяся к устью ложбина, выработанная по трещине в ордовикских песчаниках на плато Фута-Джаллон в Гвинее. Ее развитие отвечает, примерно, стадии 2 на рис. 2.

Ширина образующегося прохода и его форма зависят, конечно, от ширины самой ослабленной зоны, но также и от соотношения скоростей “консеквентного” отступления склона вдоль этой зоны и поперечного к ней отступления стенок прохода. Чем больше контраст между прочностью пород в зоне и вне ее, тем возникающий проход оказывается уже и имеет более крутые стенки. На рис. 2(4) показан тот же момент времени, что и на рис. 2(3), но при условии, что скорость отступления склона вне ослабленной зоны еще в два раза меньше: $A = 0.5$ вне интервала $12 < x < 16$. Такой же результат мы получим, удвоив коэффициент A внутри этого интервала, но за меньшее время. В предельном случае, когда вне ослабленной зоны отступление склонов отсутствует (или им можно пренебречь), ширина прохода минимальна и не должна превышать ширины самой ослабленной зоны (рис. 2(5)).

Для того, чтобы отступление склонов ложбины происходило по всей их высоте, необходимо удаление рыхлого материала, скапливающегося на днище. Если для этого недостаточно действия дефляции и гравитационного сползания материала, то такую функцию может выполнять водоток, как правило, протекающий, хотя бы и временно, по дну ложбины. Хотя данная модель не учитывает его русловой деятельности, он может обеспечивать сохранение местного базиса на постоянном или достаточно низком уровне, тем самым, поддерживая отступление склонов ложбины по всей их высоте.

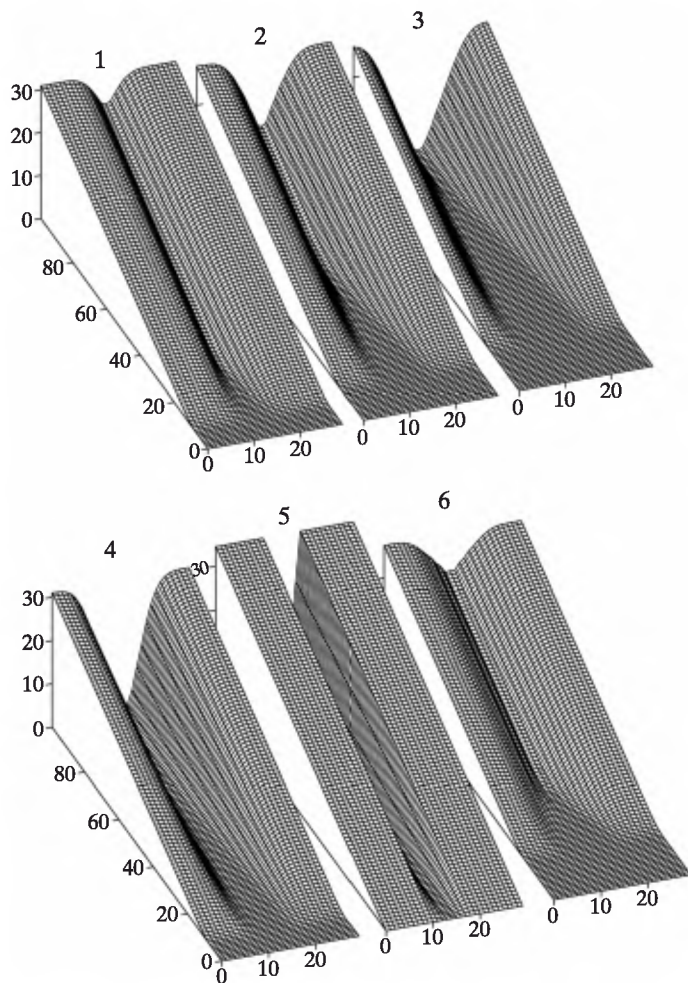


Рис. 2. Возникновение поперечного прохода по ослабленной зоне
1–3 – стадии развития, соответствующие моментам $t = 10, 15, 20$, при $A = 2.3$ в интервале $12 < x < 16$ и $A = 1$ на остальном простирании склона; 4 – аналог 3, но $A = 0.5$ вне интервала $12 < x < 16$; 5 – то же, но $A = 0$ вне указанного интервала (на рисунке видно, что ширина прохода в верхней его части несколько больше ширины ослабленной зоны, но это происходит за счет осреднения некоторых величин, неизбежного при вычислениях по сетке); 6 – то же, но $C = 1$ внутри указанного интервала



Рис. 3. Расширяющаяся к устью ложбина, сформированная по трещине в ордовикских песчаниках на плато Фута-Джаллон
Длина ложбины 4500 м, глубина у устья 350 м

склона возникает форма, подобная седловине, как показано на рис. 4. Здесь $A = 2.3$ при одновременном выполнении условий $12 < x < 16$ и $h > 15$. На остальных участках склона $A = 1$. Описанные выше особенности развития поперечной ложбины сохраняются и для такой седловины.

Линейная дайка – гребень. Другой пример избирательной денудации на склоне – пересекающая его полоса более прочных пород. В этом случае на соответствующем участке склона вдоль оси x коэффициенты уравнения (1), определяющие скорость его снижения, будут меньше, чем на остальном его протяжении. На месте дайки образуется гребень, относительная высота которого будет тем больше, чем шире сама дайка, и чем больше контраст между прочностью пород дайки и вне ее. На рис. 5(1–3) показаны три последовательных стадии такого процесса. В интервале значений $11 < x < 17$ коэффициент $A = 1$, вне этого интервала – 3, остальные коэффициенты – нулевые. Образующийся гребень вначале невысок и имеет пологие боковые грани (рис. 5(1)); затем его высота относительно прилегающего склона увеличивается и достигает (примерно, ко времени $t = 20$) некоторого предельного значения, которое в дальнейшем не меняется, поскольку снижающийся склон и разрушающаяся дайка находятся в состоянии динамического равновесия [12]. На горизонтальной поверхности на уровне базиса денудации, замещающей отступающий склон, такой гребень сохраняется в виде снижающегося “хребтика”, который также постепенно срезается с боков. Интересно, что если учесть возможное дополнительное быстрое разрушение острой верхушки гребня с большой положительной плановой кривизной, т.е. ввести в расчеты коэффициент C , задав его, например, равным 0.5, то это сильно уменьшит высоту гребня, и его вершина станет более плоской; результат развития к моменту $t = 20$ для этого случая изображен на рис. 5(4).

Максимальная крутизна склонов дайки и, соответственно, ее высота определяют скорость снижения главного склона, т.е. местного для данного сечения дайки базиса денудации и скоростью снижения самой дайки. Так, если в предыдущем примере коэффициент A в выделенном интервале принять в 4 раза меньшим, т.е. $A = 0.25$, то образующийся гребень будет значительно выше, как это видно из рис. 5(5). В соответствующий этому рисунку момент времени $t = 20$ динамическое равновесие еще не

Недостаточное удаление материала, скапливающегося в днище ложбины, будет замедлять ее углубление и может быть учтено введением либо коэффициента C в областях склона с положительной плановой кривизной, т.е. в ложбине, и/или коэффициента B на вогнутых участках склона. И в том и в другом случае развитие прохода замедляется, а его склоны оказываются более пологими. Рис. 2(6) соответствует рис. 2(3), но коэффициент $C = 1$ внутри интервала $12 < x < 16$ и $C = 0$ – вне его.

Ослабленная зона, идущая вкrest простираения главного склона, может проходить не на всю его глубину, а располагаться выше какого-то уровня.

В этом случае в верхней части

достигнуто; это происходит примерно к $t = 27$, когда относительная высота гребня становится в 4 раза больше, чем на рис. 5(3).

Вытянутая дайка может располагаться и параллельно склону. В этом случае малые значения коэффициента A , соответствующие более прочным породам, следует задавать в каком-то интервале значений оси y . Пусть этот интервал определяется условием $40 < y < 50$. Допустим, что склон развивается путем параллельного отступания, и прочность дайки существенно превышает прочность окружающих пород – в этом случае эффект возникновения положительной остаточной формы на отступающем склоне выражен особенно ярко. Пусть внутри указанного интервала $A = 0.2$, а за его пределами $A = 2$. На рис. 6 показаны три стадии развития такого склона. На первых стадиях участки с первоначальным наклоном сохраняются в верхней и нижней частях склона и в пределах самой дайки. Для вышележащей части склона дайка служит местным базисом денудации, к которому привязана постепенно расширяющаяся субгоризонтальная поверхность. Ее слабый наклон соответствует медленному снижению этого базиса, т.е. снижению вершины дайки. В нижней, быстро отступающей части склона, непосредственно под дайкой формируется крутой уступ, а у подножия склона – педимент.

Наконец, рассмотрим случай изолированной дайки, имеющей в плане квад-

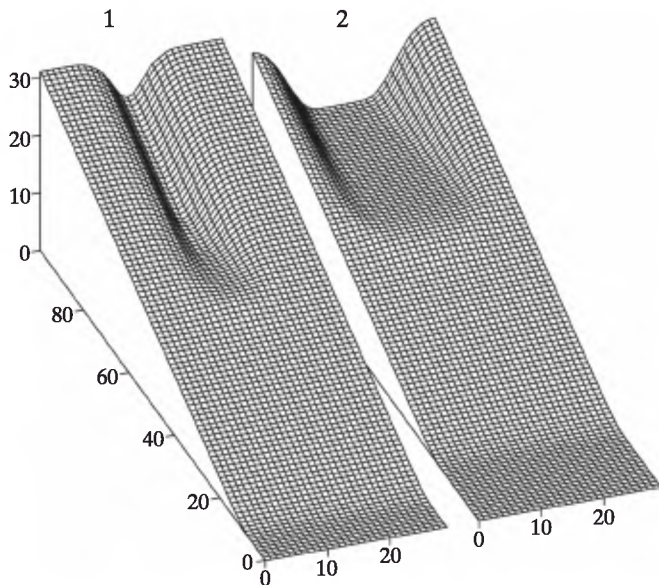


Рис. 4. Возникновение седловины по ослабленной зоне

1, 2 – последовательные стадии развития, соответствующие моментам $t = 10$ и $t = 20$

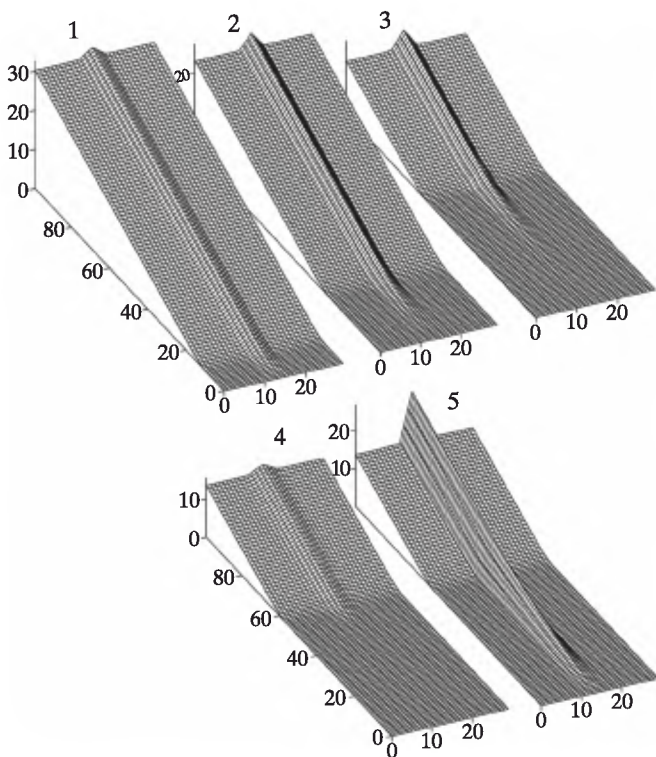


Рис. 5. Образование гребня на склоне

1–3 – стадии, соответствующие моментам $t = 4, 10, 20$ при $A = 1$ в интервале $11 < x < 17$ и $A = 3$ вне его; 4 – аналог 3, но $C = 0.5$ в указанном интервале; 5 – то же, но $A = 0.25$ в указанном интервале

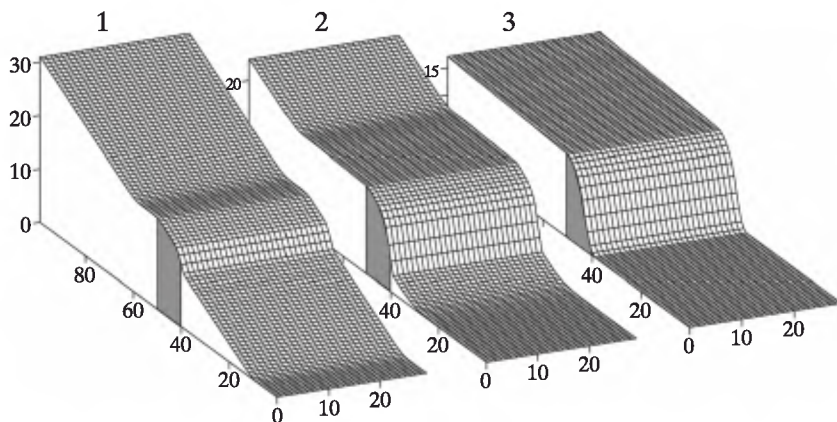


Рис. 6. Развитие склона с дайкой, линейной по простиранию

На боковых гранях заштрихованы более прочные породы: $A = 0.2$ в интервале $40 \leq y \leq 50$, $A = 2$ – вне этого интервала. 1–3 – стадии, соответствующие моментам $t = 5, 15, 25$

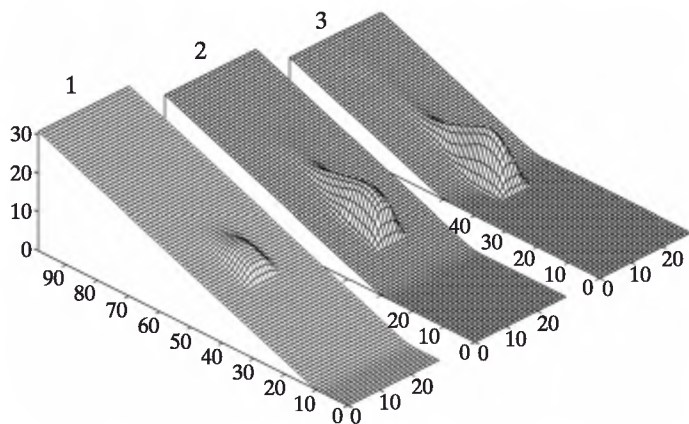


Рис. 7. Развитие склона с квадратной в плане дайкой: $A = 0.2$ при $10 \leq x \leq 20$ и $40 \leq y \leq 50$, в остальных частях склона $A = 2$

1–3 – стадии, соответствующие моментам $t = 5, 15, 25$

ратную форму. Пусть по оси x она занимает интервал $10 \div 20$, по оси y – интервал $40 \div 50$. Положим, как и в предыдущем случае, для пород дайки $A = 0.2$, для остального склона $A = 2$. Последовательные стадии этого процесса показаны на рис. 7. На стадии 1 мы видим только обнажившуюся вершину дайки. Поскольку она снижается гораздо медленнее, чем окружающие части склона, и служит локальным базисом денудации для примыкающего к ней

сверху участка, то в тылу дайки на этом участке образуется гребень, соединяющий дайку со склоном (стадия 2). Быстрое отступление боковых граней этого гребня приводит к его постепенному снижению, обгоняющему снижение самой дайки и вершина гребня “провисает” (стадия 3).

Ступенчатый купол. Еще один интересный пример избирательной денудации – развитие куполообразной положительной формы, сложенной слоями различной прочности. Пусть исходная форма представляет собой сферический сегмент радиуса 30 и высотой 20 единиц (рис. 8(1)). Слагающие его породы в интервалах высот $7 \div 9$, $12 \div 15$ и >17 имеют относительно невысокую прочность, а в остальных повышенную: коэффициент A имеет значения, соответственно, 0.5 и 0.1. Для слабых слоев учтем также некоторое дополнительное снижение выпуклых в плане склонов, положив коэффициент C отличным от нуля: $C = 0.2$.

При этих условиях развитие данной формы будет происходить так, как показано на рис. 8(2–3). На поверхностях прочных слоев возникают горизонтальные ступени, которые, развиваясь, постепенно “съедают” вышерасположенную часть купола. Вначале выработка ступеней происходит довольно быстро – к моменту $t = 6$ (рис. 8(2))

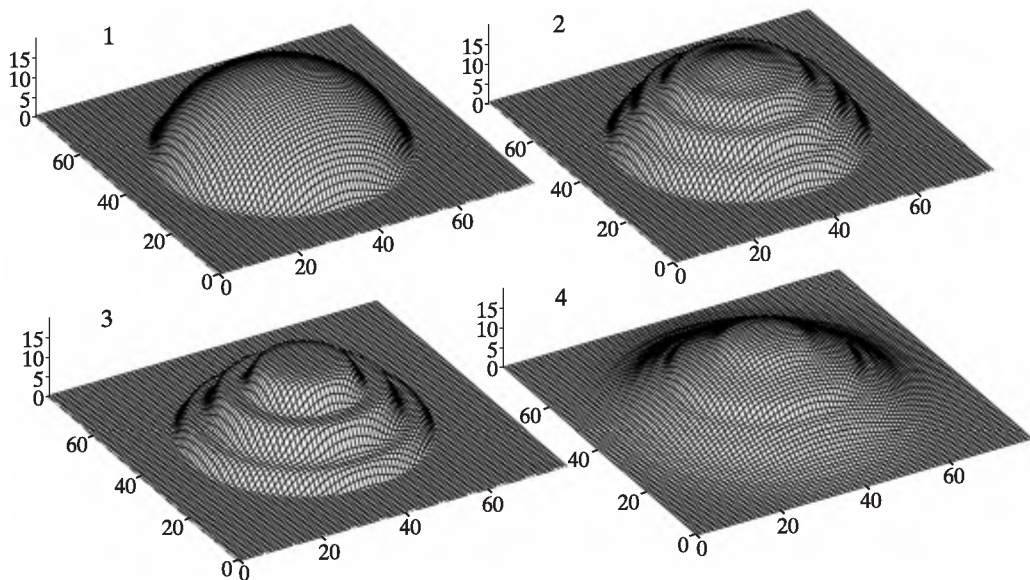


Рис. 8. Развитие слоистого купола

1 – исходная форма; 2, 3 – стадии, соответствующие моментам $t = 6, 25$; 4 – аналог 3, но $B = 1$ и $B = 5$ в прочных и слабых слоях, соответственно. Остальные значения коэффициентов указаны в тексте

ступени уже вполне оформлены, но затем развитие замедляется, и к моменту $t = 25$ (рис. 8(3)) изменения формы невелики, лишь верхняя часть купола, частично еще сохранявшаяся на рис. 8(2) и сложенная слабыми породами, оказывается полностью срезана. На рис. 8(3) видно, что все ступени продолжают отступать, но медленнее, чем это происходило в верхней части купола, поскольку скорость этого отступления лимитируется скоростью отступления участков склона, сложенных прочными породами.

Как и в других случаях, введение коэффициента B , ответственного за вязкое течение увлажненного грунта на склоне, приводит к сглаживанию ступеней и, соответственно, к заметно худшей выраженности литоморфных особенностей рельефа, что хорошо видно из рис. 8(4).

Иллюстрацией результата описанного процесса могут служить формы избирательной денудации в слоистых толщах. На рис. 9(1) показан останец (один из множества подобных, расположенных рядом), выработанный в миоценовых континентально-лагунных отложениях пустыни Деште Кевир (Иран), в так называемой верхней красной толще, представленной песчаниками, аргиллитами, мергелями и т.д. – породами различной устойчивости к выветриванию [13, 14]. На рис. 9(2) – другой останец схожей морфологии, выработанный в породах фаменского яруса девона и расположенный на левобережье р. Икан-Су в центральном Каратау. Возможно, что роль бронирующих пластов играют в данном случае поверхности напластования, более стойкие к разрушению.

Заключение

Прежде всего, еще раз подчеркнем, что кинематические модели – одни из простейших моделей развития форм рельефа. Они позволяют прогнозировать развитие форм во времени, но требуют знания скорости снижения поверхности, имеющей те или иные морфологические параметры. Модель, рассматриваемая в данной работе, опирается на определенные предположения о зависимости этой скорости от морфологии скло-

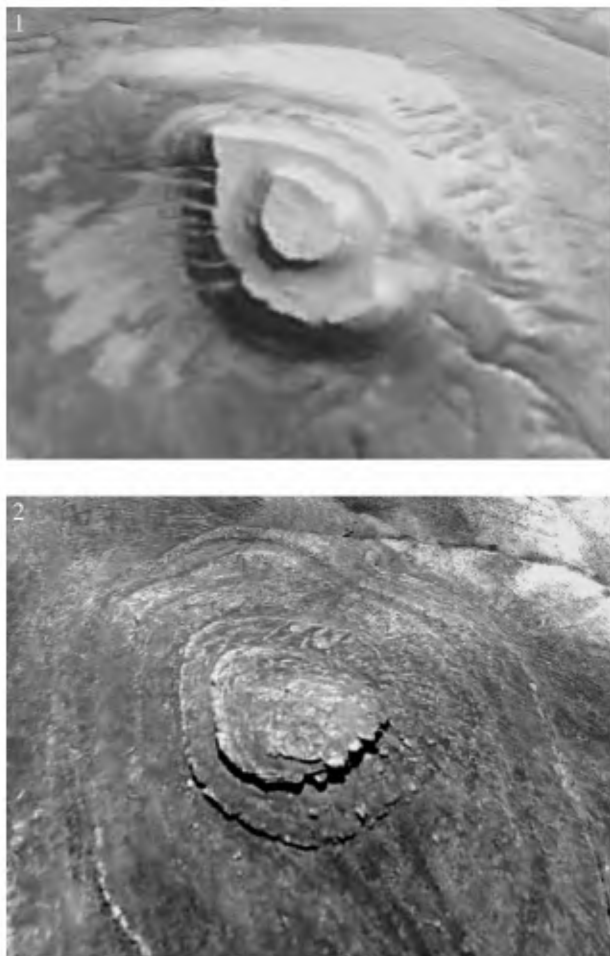


Рис. 9. Террасированные останцы

1 – в пустыне Деште Кевир (Иран), диаметр верхней округлой ступени 15–20 м, высота холма 10 м, 2 – в Центральном Каратау, диаметр верхнего слоя около 50 м, высота холма 35 м

предположения относительно закономерностей разрушения склонов были достаточно реалистичны. Результаты моделирования показывают, что важную роль в этом процессе играют такие факторы, как соотношение прочностей и первичная морфология неоднородных пород, составляющих субстрат рельефа, а также время протекания процесса. Влияние слоев различной прочности распространяется на выше- и нижележащие части склона. Бронирующий слой с определенного момента блокирует отступление нижележащей поверхности, в результате чего возникает более крутосклонная форма. При отступании склона, сложенного неоднородными породами, он меняет свою конфигурацию, не оставаясь подобным самому себе, как это было бы в случае однородного субстрата.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что возникновение многих форм рельефа, порожденных избирательной денудацией неоднородных пород, обусловлено, в первую очередь, механизмом параллельного отступления склонов. Именно поэтому наиболее ярко эти черты выражены в аридных условиях, где процессы течения увлажненного грунта играют подчиненную роль.

на и показывает, как будет развиваться рельеф при справедливости этих предположений. Хотя последние представляются достаточно логичными, они, конечно, не исчерпывают всех возможных связей между морфологией склона и скоростью его снижения. Эти связи могут быть более сложными и различаться для разных условий. Они могут быть определены путем натурных наблюдений за развитием склонов и применены вместо предложенных или наряду с ними в аналогичной модели. Вместе с тем, простота кинематических моделей и отсутствие необходимости знания многих плохо известных и трудно определяемых параметров, делают их использование вполне оправданным. Задавая различные значения коэффициентов основного уравнения, которые могут быть изменчивыми и в пространстве и во времени, мы как бы управляем модельным процессом и получаем картину эволюции самых разнообразных форм.

В данной работе с помощью кинематической модели наглядно продемонстрирована последовательность развития литогенных форм рельефа. Сходство модельных форм с природными подтверждает, что исходные

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пенк В. Морфологический анализ. М.: Географгиз, 1961. 359 с.
2. Pain C.F., Ollier C.D. Inversion of relief – a component of landscape evolution // *Geomorphology*. 1995. V. 12. P. 151–165.
3. Ройхваргер З.Б., Махинов А.Н. Влияние неоднородности литологического состава пород на развитие рельефа // *Геоморфология*. 1984. № 1. С. 79–85.
4. Römer W. Multiple planation surfaces in basement region: implications for the reconstruction of periods of denudation and uplift in southern Zimbabwe // *Geomorphology*. 2010. V. 114. P. 199–212.
5. Strudley M.W., Murray A.B. Sensitivity analysis of pediment development through numerical simulation and selected geospatial query // *Geomorphology*. 2007. V. 88. P. 329–351.
6. Бронгулеев В.Вад. Некоторые особенности развития ступенчатых склонов: результаты кинематического моделирования // *Геоморфология*. 2009. № 2. С. 3–11.
7. Бронгулеев В.Вад. Трехмерная кинематическая модель эволюции склонов // *Геоморфология*. 2011. № 1. С. 3–12.
8. Бронгулеев В.Вад. Взаимодействие эндогенных и экзогенных процессов при росте локальных морфоструктур // *Геоморфология*. 2013. № 1. С. 3–11.
9. Трофимов А.М., Московкин В.М. Математическое моделирование в геоморфологии склонов. Казань: Изд-во КазГУ, 1983. 218 с.
10. Щукин И.С. Общая геоморфология. Т. 3. М.: Изд-во МГУ, 1974. 382 с.
11. Ефремов Ю.В., Шелюк А.А. Морфология и генезис перевальных седловин и горных проходов Западного Кавказа // *Геоморфология*. 2012. № 3. С. 84–93.
12. Поздняков А.В. Динамическое равновесие в рельефообразовании. М.: Наука, 1988. 208 с.
13. Geological Map of Iran 1:2500000. <http://library.wur.nl/isric/index2html?url=http://library.wur.nl/WebQuery/isric/20535>.
14. Amini A. Red colouring of the Upper Red Formation in central part of its basin, central zone, Iran // *Journ. Sci. Isl. Rep. Iran*. 2001. V. 12. № 2. P. 145–156.

Ин-т географии РАН

Поступила в редакцию
19.02.2013

KINEMATIC MODELLING OF THE LITHOGENIC LANDFORMS DEVELOPMENT

V.Vad. BRONGULEEV

Summary

With the use of kinematic model based on the differential equation of parabolic type the development of some landforms with heterogeneous substratum was demonstrated. The likeness of the modelled and natural landforms confirms the reliability of the supposition about slope degradation used in the model. The morphology of lithogenic forms at every time step depends on the relation of strengths of the different rocks in the substratum and the initial morphology of the layers. The influence of the layers with different strength spreads up and down slope. The hard rock layer blocks the degrading of the lower part of the slope thus increasing its steepness. Degrading of the heterogeneous slope changes its configuration, which doesn't stay similar to itself as it would happen at the condition of homogeneous substratum.

The results prove that many characteristic lithogenic features of landforms rise due to parallel slope degradation. That is why such features are most prominent in the arid regions, where the processes of viscose flow on the slopes are negligible.