

УДК 551.4.013+551.4.037

© 2011 г. В. В. АД. БРОНГУЛЕЕВ

ТРЕХМЕРНАЯ КИНЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ СКЛОНОВ**Введение**

Динамические модели развития форм земной поверхности, в частности, склонов требуют задания многих физических свойств горных пород и почвогрунтов – их прочности, вязкости, внутреннего трения, пористости и других. Знание этих параметров и законов деформации субстрата дает возможность определить скорость перемещения материала и, в конечном счете, скорость денудации. Однако количественная оценка подобных характеристик для длительных периодов времени обычно возможна лишь как “эффективных”, определяемых не путем непосредственных измерений на образцах грунтов, а по суммарному результату процессов за длительный срок, поскольку все эти свойства чрезвычайно изменчивы и зависят от многих факторов, например, влажности, растительного покрова, гранулометрического состава, характерного времени процессов и т.д. К тому же реальное поведение субстрата не подчиняется законам идеальных тел (вязкого или пластичного), что сильно усложняет создание таких моделей. В этих условиях определенным преимуществом обладают кинематические модели, в которых свойства субстрата, его реакция на действующие силы, и сами эти силы не рассматриваются, то есть не составляются динамические уравнения движения. Вместо этого задается непосредственно скорость денудации, например, скорость снижения поверхности склона и ее зависимость от морфологии последнего – высоты, уклона, кривизны. Это позволяет довольно легко проследить эволюцию различных форм рельефа при различных предположениях о виде указанной зависимости и действии внешних факторов, которые в совокупности и определяют морфологические особенности эволюционирующих форм.

Ранее мы рассматривали двумерную кинематическую модель развития склона, в которой учитывались крутизна склона и его профильная кривизна – выпуклость-вогнутость [1]. В настоящей работе мы рассматриваем более общий трехмерный случай, когда помимо профиля склона учитываются также и его плановые очертания. Переход к трехмерной задаче позволяет 1) моделировать развитие не только линейных, т.е. не меняющихся по простиранию склонов, но и трехмерных форм произвольной конфигурации, 2) оценить роль плановой кривизны в развитии форм и выяснить условия, при которых она заметна, 3) получить наглядную пространственную картину эволюции рельефа для различных условий снижения склона и различного режима тектонических движений.

Описание модели

В двумерном случае высота склона h рассматривается как функция одной пространственной переменной x и времени t . В работе [1] было предложено уравнение для скорости снижения склона, выражающее ее зависимость от градиента (тангенса

угла наклона) склона, его вертикальной кривизны и внешних воздействий – тектонических движений (или изменений базиса эрозии):

$$\partial h/\partial t = -A |\partial h/\partial x| + B \partial^2 h/\partial x^2 \sqrt{1 + (\partial h/\partial x)^2} + f(x, t), \quad (1)^1$$

где коэффициенты A и B показывают, насколько важны вклады, соответственно, градиента и вертикальной кривизны в скорость снижения склона, $f(x, t)$ – скорость тектонических поднятий или опусканий. При этом предполагалось, что денудация происходит по нормали к поверхности склона со скоростью пропорциональной синусу угла наклона склона, т.е. силе, действующей на частицы на поверхности и направленной вниз по склону.

В трехмерном варианте высота в каждый момент времени рассматривается как функция двух пространственных переменных x и y . В этом случае в данной точке форма склона кроме градиента и вертикальной кривизны, т.е. кривизны профиля склона, определяется еще одной морфологической характеристикой – горизонтальной кривизной или кривизной линий уровня. Ее величина показывает, принадлежит ли данный участок склона ложбине (кривизна отрицательна) или “структурному носу” (кривизна положительна), т.е. сходятся или расходятся линии тока на его поверхности. Понятно, что эта важная характеристика также должна учитываться в модели. Тогда при сделанных ранее предположениях относительно денудации склона аналогичное уравнение для трехмерного случая будет выглядеть следующим образом:

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

Здесь $\partial h/\partial t$ – скорость перемещения поверхности склона (снижению соответствуют отрицательные значения), $|\text{grad}h|$ – абсолютная величина градиента, $K_{\text{вер}}$ и $K_{\text{гор}}$ – вертикальная и горизонтальная кривизны, $f(x, y, t)$ – скорость тектонических движений. Будем считать коэффициенты A , B и C положительными. Тогда перед первым членом в правой части должен быть знак “–”, что соответствует снижению склона при наличии уклона, вне зависимости от направления градиента. Мы также допускаем, что за счет влияния вертикальной кривизны на выпуклых участках будет происходить ускоренная денудация по сравнению с плоскими такой же крутизны, а на вогнутых – замедленная или аккумуляция. Поскольку отрицательные значения вертикальной кривизны соответствуют выпуклому склону, а положительные – вогнутому, то при втором члене в правой части уравнения (2) стоит знак “+”. Знак при третьем члене (с коэффициентом C) зависит от наших предположений относительно влияния горизонтальной кривизны на денудацию склона. Если не рассматривать линейную эрозию, то можно предположить, что в ложбинах за счет конвергенции рыхлого материала происходит аккумуляция (см., например, [7]), а на “структурных носках” наоборот, происходит ускоренный снос материала и дополнительное снижение поверхности. Тогда, поскольку в ложбинах горизонтальная кривизна отрицательна, а на гребнях положительна, перед третьим членом должен стоять знак “–”. Однако, если допустить значительную концентрацию стока в ложбинах и наличие линейной эрозии, то по тальвегам будет происходить дополнительное снижение поверхности и этот знак должен быть положительным, но при этом на гребнях возникает “аккумуляция”, что совершенно неестественно. Очевидно, в таком случае мы имеем более сложную зависимость третьего члена от морфологии склона, конкретный вид которой пока предложить затруднительно. Кроме того, для описания эрозионных процессов уравнения (2) уже недостаточно. Поэтому мы ограничимся рассмотрением такого случая, когда при коэффициенте C стоит знак “–”, которому могут соответствовать не слишком протяженные склоны с отсутствием линейной эрозии в тальвегах ложбин.

¹ Уравнения такого типа (параболические или теплопроводности) известны и применяются в геоморфологии давно (см., например, [2–6] и др.).

Величины градиента и кривизны вычисляются по следующим формулам:

$$|\text{grad}h| = \sqrt{h_x^2 + h_y^2}, \quad (3)$$

$$K_{\text{вер}} = (h_x^2 h_{xx} + h_y^2 h_{yy} + 2h_{xy} h_x h_y) / (h_x^2 + h_y^2)(1 + h_x^2 + h_y^2)^{3/2}, \quad (4)$$

$$K_{\text{гор}} = (-h_{xx} h_y^2 - h_{yy} h_x^2 + 2h_{xy} h_x h_y) / (h_x^2 + h_y^2)^{3/2}. \quad (5)$$

Здесь и далее нижними индексами x , xx , y , yy , xy для краткости записи обозначены первые и вторые частные производные по соответствующим переменным.

Формула (3) вытекает из определения градиента функции $h(x,y)$ как вектора, имеющего проекции на оси x и y равные, соответственно h_x и h_y [8].

Вертикальная кривизна поверхности склона есть кривизна линии, образованной пересечением этой поверхности с вертикальной плоскостью, проходящей в направлении наибольшего падения, т.е. в направлении градиента. Кривизна такой плоской линии определяется уравнением $K = \frac{h_{ll}}{(1 + h_l^2)^{3/2}}$, где l – в данном случае горизонтальная

координата в направлении градиента. Первая производная по этой координате вычисляется, как известно, следующим образом: $h_l = h_x \cos \varphi + h_y \sin \varphi$, где φ – угол между направлением l и осью x , определяемый из условия $\tan \varphi = h_y/h_x$. Тригонометрические зависимости дают: $\cos \varphi = h_x / \sqrt{h_x^2 + h_y^2}$, $\sin \varphi = h_y / \sqrt{h_x^2 + h_y^2}$. Подставляя эти значения в выражение для h_l , взяв аналогичным образом вторую производную h_{ll} и подставляя значения производных в формулу для кривизны плоской линии, получим формулу (4).

Выражение для горизонтальной кривизны, т.е. кривизны линии уровня может быть выведено следующим образом. Пусть линия уровня задана в виде $h(x,y) = \text{const}$. Эта сложная функция задает y как неявную функцию от x , имеющую производную y_x . Полная производная функции h по x должна быть равна нулю (как постоянной), следовательно, по правилам дифференцирования сложных функций имеем: $h_x + h_y y_x = 0$, откуда $y_x = -h_x/h_y$. Дифференцируя это равенство по x (по тем же правилам), получаем выражение для второй производной y_{xx} и подставляя y_x и y_{xx} в формулу для кривизны плоской линии $K = \frac{y_{xx}}{(1 + y_x^2)^{3/2}}$, приходим к выражению (5) (см., например, [9]). В явном виде эта формула (5) приводится также в работе [10].

Отметим, что иногда горизонтальной кривизной называют кривизну так называемого второго нормального сечения, т.е. кривизну линии, образованной пересечением земной поверхности и плоскости, проходящей через вектор нормали к поверхности в данной точке и перпендикулярной линии тока [11]. На склонах близких к вертикальным эта кривизна мало отличается от кривизны линий уровня, но на слабонаклонных поверхностях отличия весьма существенны, поскольку упомянутая плоскость имеет очень крутое падение, и считать соответствующую кривизну “горизонтальной” нам представляется неудачным.

В качестве начальных условий задавались цифровые модели “исходных” форм рельефа той или иной конфигурации с одинаковым шагом по осям x и y . На границах исходной формы задавались условия в соответствии с условиями задачи. Так, постоянство уровня (базиса эрозии) на какой-то границе задается постоянством на ней значений h , равенство нулю первой производной по нормали к границе соответствует гребню или тальвегу, проходящим по границе, т.е. отсутствию потока вещества через нее и т.д. В данной работе мы ограничимся рассмотрением варианта без участия тектонических движений: $f(x,y,t) = 0$.

Численное решение уравнений (2–5) проводилось методом сеток [12] с пространственным шагом равным шагу задания исходной формы. Для повышения устойчивости результатов в программу вычислений были включены процедуры осреднения

расчетных параметров, удаления возможно возникающих в процессе счета локальных минимумов поверхности (которых не должно быть по смыслу задачи, т. к. мы не рассматриваем образование карстово-суффозионных воронок или котловин выдувания) и ограничения абсолютной величины горизонтальной кривизны, которая в некоторых особых точках стремится к бесконечности.

Результаты и обсуждение

Допустим, что исходная форма возникла тем или иным образом, в результате тектонических деформаций или во взаимодействии тектоники с экзогенными процессами, а в дальнейшем ее развитии тектоника не участвует. Рассмотрим эволюцию нескольких таких форм в зависимости от соотношения коэффициентов A , B , и C в уравнении (2), соответственно, при градиенте, вертикальной кривизне и горизонтальной кривизне. В работе [1] было показано, что снижение склона под действием процессов, характерных для аридного климата, таких, как плоскостной снос, дефляция, температурный крип, описывается первым членом в уравнении (1); второй член описывает снижение склона с аккумуляцией на вогнутых участках под действием вязкого течения грунта, характерного для гумидного климата со значительным увлажнением почвогрунтов. При рассмотрении трехмерного случая коэффициенты A и B в уравнении (2) определяют, точно так же, вклад этих процессов.

Развитие изолированной положительной формы. Пусть исходная форма представляет собой пологий холм с выпуклыми склонами и четырехгранным основанием (рис. 1А), границы которого сохраняют неизменной свою высоту на уровне базиса эрозии ($h = 0$). Преобладание процессов денудации, свойственных ариднему и семиаридному климатам, соответствует малому вкладу вертикальной кривизны склона по сравнению с градиентом т.е. условию $B \ll A$. Допустим, вначале, что вклад горизонтальной кривизны отсутствует. В таком случае развитие исходной формы будет происходить по варианту, изображенному на рис. 1Б и В. Как и ожидалось, параллельное отступление склонов приводит к постепенному сокращению центральной слабонаклонной части холма, а у подножия формируется горизонтальная ступень, отделенная четким перегибом от склона. Этот результат следует и из рассмотрения двумерной модели [1], но в данном трехмерном случае возникает еще один эффект, не описываемый двумерной задачей. Поскольку уклон исходного холма в диагональных сечениях меньше, чем уклон боковых граней, то снижение его “ребер” происходит медленнее, чем граней; в результате “ребра” оказываются выступающими, что хорошо видно на рис. 1В. Очевидно, что в действительности подобная морфология перегибов в простирании склонов, если и существует, то является редким исключением, и это заставляет предполагать действие дополнительного механизма, сглаживающего такие выступы.

По-видимому, предполагаемая нами усиленная денудация на выпуклых в плане перегибах (см. выше), возникающая за счет более интенсивной дефляции, более сильных температурных контрастов и выветривания, или за счет преимущественно дивергентного движения рыхлого материала, и является таким механизмом.

Введем в действие третий член уравнения – горизонтальную кривизну, задав $C = 0.05$ (значения коэффициентов A и B – те же). На рис. 2А показан результат снижения исходной формы в тот же момент времени, что и на рис. 1В. Видно, что эффект выступающих “ребер” полностью исчез. Кроме того, наблюдается и более быстрое снижение вершины холма, как области, где кривизна горизонталей возрастает.

Увеличивая влияние горизонтальной кривизны, т. е. величину коэффициента C , мы получим результаты, изображенные на рис. 2Б и В, соответствующие моментам времени на рис. 1Б и В. Здесь действие этого фактора приводит не просто к сглаживанию “ребер” склона, но к значительному плановому округлению всей формы, уплощению вершины холма и дополнительному снижению его высоты. Естественно, что такой сильный эффект плановая кривизна может иметь только если она достаточно велика, что имеет место на крутых переломах простирания склона или на положи-

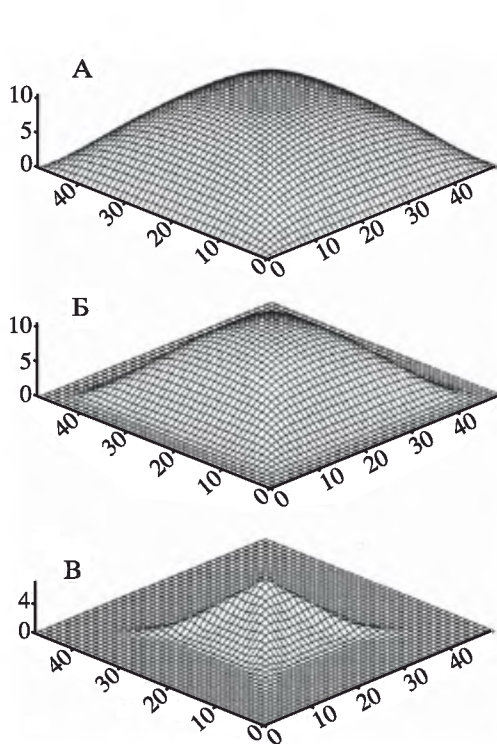


Рис. 1. Эволюция изолированной формы в результате параллельного отступания склонов при незначительном влиянии вязкого течения и отсутствии фактора горизонтальной кривизны
 А – исходная форма; моменты условного времени: Б – $t = 50$, В – $t = 150$. Коэффициенты в уравнении (2): $A = 0.1$, $B = 0.005$, $C = 0$; условие на границах $h = 0$

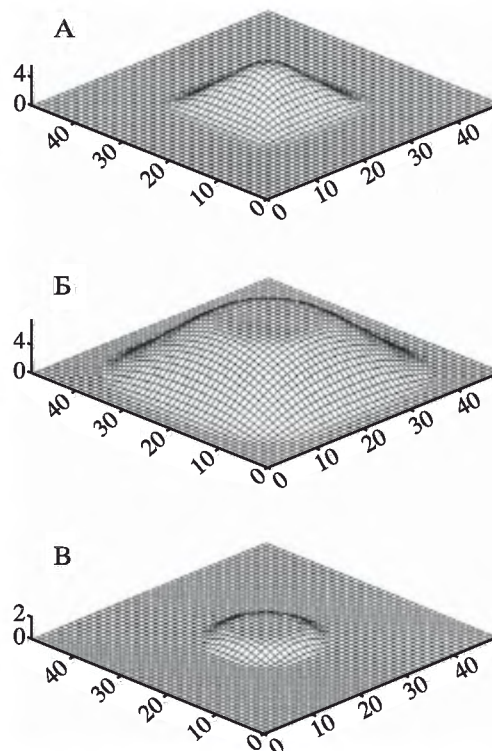


Рис. 2. Эволюция изолированной формы в результате параллельного отступания склонов при незначительном влиянии вязкого течения и при действии фактора горизонтальной кривизны
 Исходная форма та же, что на рис. 1. Моменты условного времени: А – $t = 150$ (коэффициенты $A = 0.1$, $B = 0.005$, $C = 0.05$), Б – $t = 50$, В – $t = 150$ (коэффициенты $A = 0.1$, $B = 0.005$, $C = 0.25$); условие на границах $h = 0$

тельных формах малого радиуса, то есть там, где радиус кривизны горизонталей мал. Возможно, этот процесс вносит некоторый вклад, например, в гольцовую планацию благодаря более активному проявлению процессов нивации и морозного выветривания на таких элементах рельефа (см., например, [13, 14]).

На рис. 3 показан участок расчлененного рельефа Анадырского плоскогорья, расположенный в 30 км к западу от оз. Эльгыгытгын. Здесь, в области умеренных новейших поднятий (400–800 м) [15], сформированы денудационно-тектонические складчато-глыбовые горст-антиклинальные хребты [16]. В условиях холодного климата криогенно-нивальные процессы достигают большой интенсивности. На рисунке хорошо видно, что формы с выположенными вершинами имеют заметно скругленные в плане подножия (и это свойственно не только данному конкретному району). Сочетание этих двух морфологических признаков есть следствие, как мы видели, влияния плановой кривизны на снижение поверхности склонов, что подтверждает предположение о заметном вкладе данного фактора в моделировку изображенных на рис. 3 форм.

Рассмотрим, наконец, развитие той же исходной формы при значительном участии процессов вязкого течения на склоне, т. е. при достаточно большом коэффициенте B . Пусть $A = 0.1$, $B = 1$, а C для наглядности вначале равно 0. Исходная поверхность за те же отрезки времени преобразуется так, как показано на рис. 4А и В. Профиль хол-



Рис. 3. Округлые в плане и уплощенные холмы Анадырского плоскогорья. Расстояние по нижней рамке рисунка – 3.5 км

ма приобретает пологую выпукло-вогнутую форму (рис. 4Б), но в плане его грани отчетливо сохраняются, поскольку влияние горизонтальной кривизны отсутствует. Если теперь добавить это влияние, положив, как в предыдущем случае, $C = 0.25$, то сглаживание очертаний исходной формы происходит не только в профиле, но и в плане, и за 50 условных единиц времени она приобретает вид, изображенный на

рис. 5А. Боковые грани сглажены, высота несколько меньше, чем на рис. 4А. Поскольку при участии всех трех членов уравнения (2) снижение поверхности происходит достаточно быстро, то в момент $t = 150$, высота конечной формы настолько мала, что в том же масштабе изображения почти не видна, поэтому на рис. 5Б показан момент $t = 100$. Это очень пологая, изометричная в плане форма с уплощенной вершиной. По углам, где изогипсы имеют наибольшую кривизну, за счет действия этого фактора выработаны небольшие субгоризонтальные участки.

В работе [1] было показано, что снижение склона, происходящее благодаря вязкому течению грунта и описываемое вторым членом в уравнении (1), приводит к утере характерных черт профиля склона, к сглаживанию ступеней и формированию выпукло-

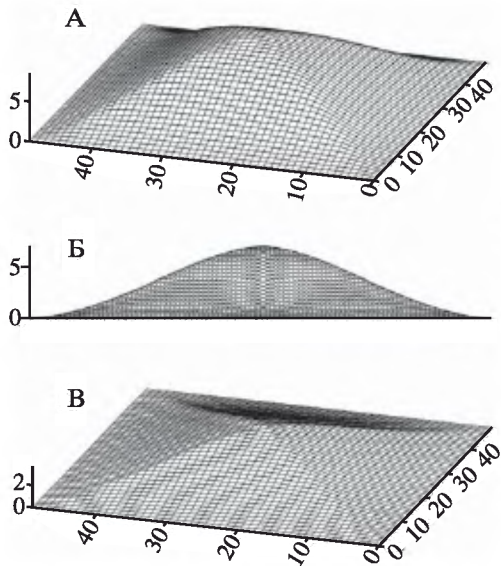


Рис. 4. Эволюция изолированной формы в результате преобладания вязкого течения на склонах при отсутствии фактора горизонтальной кривизны. Исходная форма та же, что на рис. 1. Моменты условного времени: А – $t = 50$, В – $t = 150$; Б – разрез формы А по диагонали. Коэффициенты $A = 0.1$, $B = 1$, $C = 0$; условие на границах $h = 0$

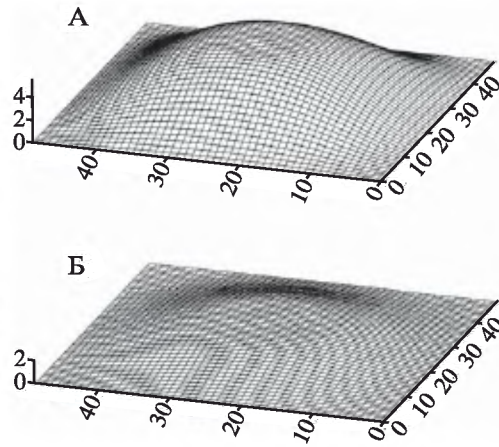


Рис. 5. Эволюция изолированной формы в результате преобладания вязкого течения на склонах при действии фактора горизонтальной кривизны. Исходная форма та же, что на рис. 1. Моменты условного времени: А – $t = 50$, Б – $t = 150$. Коэффициенты $A = 0.1$, $B = 1$, $C = 0.25$; условие на границах $h = 0$

вогнутого профиля. Результаты, представленные на рис. 4 и 5, показывают, что аналогичную роль в отношении плановых особенностей положительных форм играет третий член в уравнении (2), связанный с горизонтальной кривизной поверхности. Хотя мы и не приводим соответствующих рисунков, совершенно ясно, что благодаря этому фактору должно происходить сглаживание не только выпуклых переломов склона, но и вогнутых, то есть заполнение ложбин. Однако роль подобной “изометризации”, очевидно, весьма ограничена и проявляется лишь на резких перегибах простираения, на формах с малым радиусом кривизны или в каких-то специфических условиях. Об этом свидетельствует сравнительная редкость форм подобных тем, что изображены на рис. 2Б и В, и тот факт, что горизонтальная кривизна быстро убывает с увеличением радиуса изогипс. Возможно, также, что зависимость скорости снижения поверхности от горизонтальной кривизны носит более сложный характер, чем простая пропорциональность, принятая в уравнении (2). Наконец, напомним, что такое важное обстоятельство, как концентрация стока в ложбинах и возникновение линейной эрозии, не сглаживающей, а напротив, углубляющей ложбины, в данной модели не учитывается.

Педиментация в грядовом рельефе. Рассмотрим эволюцию другой, более сложной пространственной формы, описываемую данной моделью. Пусть волнообразно деформированная поверхность имеет общий наклон по простираению изгибов и на уровне $h = 0$ опирается на продольный базис эрозии, как это изображено на рис. 6А. На нижней границе соблюдается равенство высот 0, остальные границы свободны, как если бы поверхность продолжалась под тем же углом за пределы рисунка. Ее развитие под действием процессов только параллельного отступления склонов ($A = 0.1, B = 0, C = 0$) приводит к преобразованию скругленных форм в островершинные и одновременно к выработке плоских поверхностей как между поперечными поднятиями, так и вдоль основного базиса. Рисунок 6Б показывает результат такого развития в момент времени $t = 140$, – своеобразное сочленение педиментов. В реальных условиях у подножия крутого склона, где вертикальная кривизна склона отрицательна, существует, как правило, хотя бы частичная аккумуляция рыхлого материала. Для учета этого фактора следует положить отличным от 0 коэффициент B . Однако в аридной обстановке на привершинных, выпуклых участках склона тогда должно возникать дополнительное

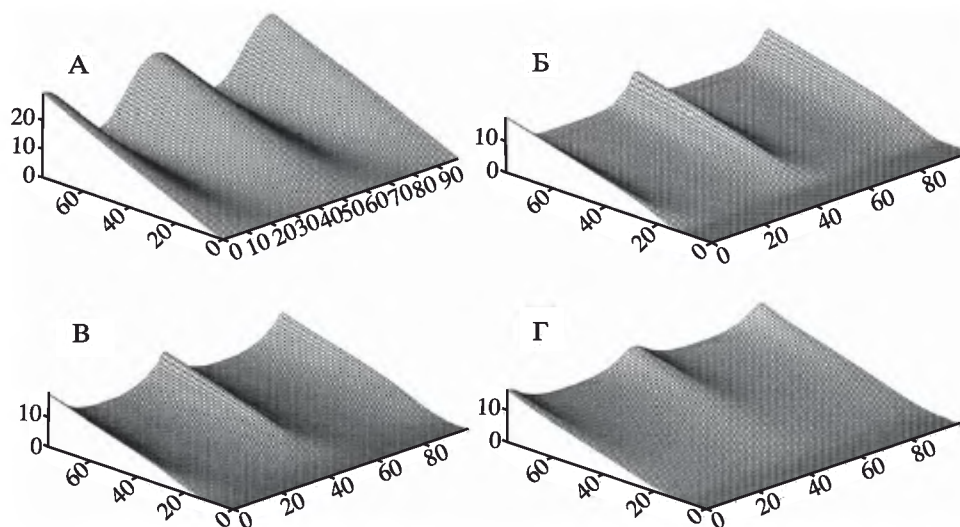


Рис. 6. Эволюция грядового рельефа
 А – исходная форма; Б (действует только параллельное отступление склонов, коэффициенты $A = 0.1, B = 0, C = 0$), В (действуют параллельное отступление и аккумуляция у подножия, коэффициенты $A = 0.1, B = 0.2, C = 0$), Г (действуют все три фактора, коэффициенты $A = 0.1, B = 0.2, C = 0.15$) – момент условного времени $t = 140$

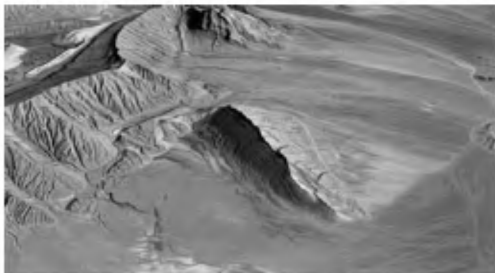


Рис. 7. Педименты в отрогах хр. Кухруд, Иранское нагорье. Расстояние по нижней рамке рисунка 6 км

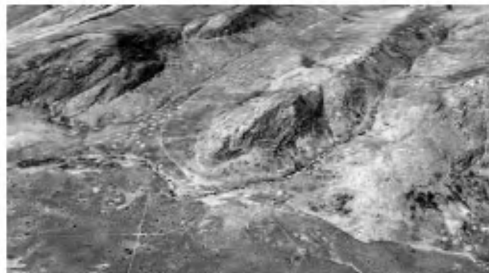


Рис. 8. Педименты нагорья Малый Намакваленд, ЮАР. Расстояние по нижней рамке рисунка 1.4 км

снижение за счет вязкого течения грунта, чего в аридной обстановке практически не происходит, поэтому можно поставить условие: если вертикальная кривизна склона положительна, то $B = 0$. В этом случае, приняв, например, $B = 0.2$, (для участков с отрицательной вертикальной кривизной) мы получаем педименты, слегка приподнимающиеся вблизи подножия крутых склонов, как это изображено на рис. 6В.

Если речь идет о формах небольшого размера, плановая кривизна которых велика, то может возникнуть дополнительное разрушение вдоль гребневых линий поверхности. Введение соответствующего коэффициента C выразится в некотором уплощении гребней, сопровождающимся и более быстрым отступанием поперечных поднятий. На рис. 6Г изображен вариант такого развития исходной формы при $A = 0.1$, $B = 0.2$, $C = 0.15$. В этом случае гряды, разделяющие широкие слабонаклонные педименты, имеют не островершинные гребни, а сглаженные вершины. (Влияние плановой кривизны может также оказаться заметным и в том случае, если скорость параллельного отступления склонов очень мала и гребни успевают разрушаться).

В аридных горных странах можно найти многочисленные примеры подобных форм, один из которых показан на рис. 7 (отроги хр. Кухруд, Иранское нагорье; описание педиментов последнего приведено в работе [17]), другой – на рис. 8 (ЮАР, Малый Намакваленд, где также описаны многочисленные педименты [18], совершенно схожие с изображенными на рисунке).

Интересно отметить, что на определенной стадии развития влияние начальной формы исходной поверхности на конечный результат оказывается слабо заметным. Рассмотрим, например, вместо наклонной волнообразной поверхности, изображенной на рис. 6А, наклонную поверхность, находящуюся в ранней стадии расчленения – прорезанную сравнительно узкими долинами (рис. 9А). Если ее дальнейшее развитие происходит под действием отступления склонов ($A = 0.1$, как и в предыдущем случае, а коэффициенты B и C равны 0), то к моментам времени $t = 140$ и $t = 210$ она будет проходить стадии, показанные на рис. 9Б, В. Рельеф, показанный на рис. 9В оказывается подобным тому, что изображен на рис. 6Б. Параллельное отступление склонов постепенно уничтожает исходную поверхность, преобразуя рельеф в систему прямых склонов, опирающихся на субгоризонтальный педимент. Несколько большее время, необходимое для достижения формы на рис. 9В, связано с узостью исходных долин и большей шириной водораздельного пространства на рис. 9А.

Формирование “вогнутого” рельефа. Если в развитие той же исходной поверхности мы добавим аккумуляцию на вогнутых перегибах склонов, то в момент времени $t = 210$ она примет вид 9Г, что весьма похоже на рис. 6В – педименты наклонные к центру долины. Такая модель служит также косвенной иллюстрацией того, как выпуклые склоны “молодого” рельефа, постепенно переходят в вогнутые “дряхлого” в полном соответствии с интерпретацией Стралером гипсографических кривых различных стадий развития водосборного бассейна [19] и мнением Л. Кинга о том, что “вогнутый

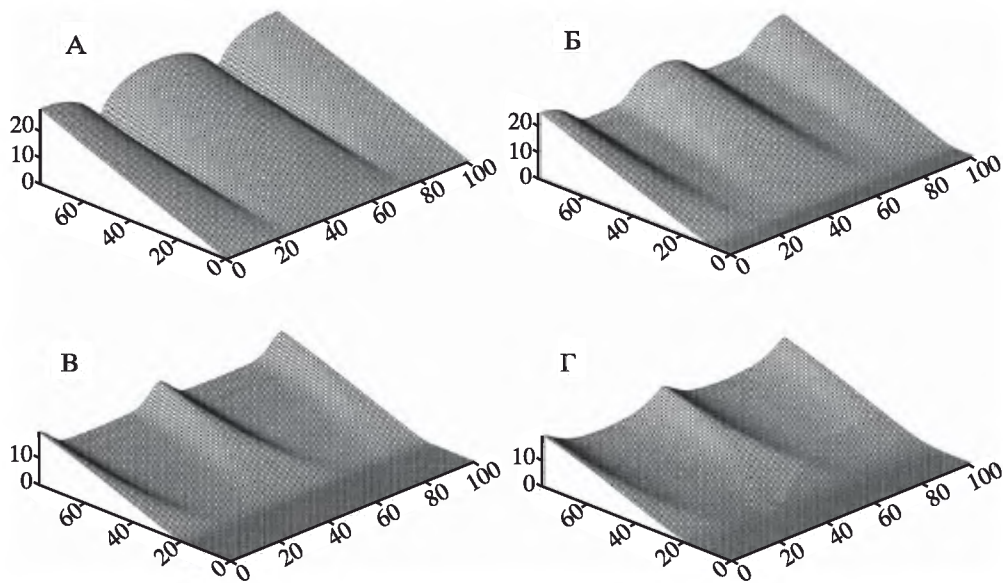


Рис. 9. Эволюция наклонной расчлененной поверхности в результате параллельного отступания склонов (Б, В) и при участии аккумуляции (Г)
 А – исходная форма; моменты условного времени: Б – $t = 140$, В – $t = 210$ (коэффициенты $A = 0.1$, $B = 0$, $C = 0$), Г – $t = 210$ (коэффициенты $A = 0.1$, $B = 0.05$, $C = 0$)

рельеф” характерен для “далеко зашедшей стадии эволюции” ([20], с. 125–126). Ведь рис. 9А можно рассматривать как завершение восходящей стадии развития, во время которой преобладающей реакцией экзогенных процессов на тектонические поднятия был глубинный врез. Начиная с момента $t = 0$, по условию нашей задачи поднятие отсутствует, или, что дает тот же результат, врез по долинам (в том числе и поперечным) прекращается, и место глубинной эрозии занимают склоновые процессы. Некоторая аккумуляция у подножия крутого склона почти всегда имеет место, если только этот склон не подрезается рекой. Поэтому рис. 6В и 9Г показывают достаточно типичный случай. Точно такой же “вогнутый” рельеф мы получим, если днище поперечных долин с самого начала лежит на нулевом или близком к нему уровне, т. е. глубинная эрозия полностью исчерпала свои возможности. Вместе с тем, “вогнутый” рельеф реализуется только в том случае, если вклад первого члена уравнения (2) существенно превышает вклад второго, т.е. преимущественным процессом является параллельное отступление склонов. В условиях гумидного климата, где вязкое течение грунта играет заметную роль, типичным профилем для рельефа в стадии старости будет выпукловогнутый.

Заключение

Предложенная трехмерная кинематическая модель развития склонов позволяет продемонстрировать эволюцию различных форм рельефа, развивающихся под воздействием склоновых процессов, при различных видах влияния морфометрических характеристик поверхности на скорость денудации. Моделирование может проводиться для исходных форм произвольной конфигурации. Учет действия трех морфологических характеристик поверхности – уклона и вертикальной и горизонтальной кривизн – позволяет описать разнообразные типы развития рельефа и объясняет формирование многих особенностей его морфологии.

Горизонтальная кривизна поверхности может существенно влиять на облик эволюционирующих форм, Это влияние выражается в сглаживании граней рельефа, упло-

шении вершин, выработке педиментов у подножия форм типа структурного носа. Роль горизонтальной кривизны в сглаживании плановых граней рельефа аналогична роли вертикальной кривизны в уничтожении особенностей профиля.

Показаны некоторые особенности формирования педиментов в условиях исходного рельефа сложной конфигурации: “сочленение” педиментов при существовании местных базисов эрозии на разных уровнях, формирование “вогнутого” рельефа, конвергенция форм в процессе отступления склонов.

Заметим, что возможности данной модели далеко не ограничены приведенными результатами. С ее помощью легко продемонстрировать развитие различных форм при действии тектонических движений разнообразных типов, при различной по площади или по вертикали устойчивости пород, т. е. различной скорости денудации. Эти вопросы представляют большой интерес, и получить соответствующие результаты можно, добавляя в уравнение (2) функцию $f(x, y)$ того или иного вида и задавая изменяющиеся в пространстве или во времени коэффициенты A , B и C , но это предмет для отдельной публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бронгулеев В.Вад.* Некоторые особенности развития ступенчатых склонов: результаты кинематического моделирования // Геоморфология. 2009. № 2. С. 3–11.
2. *Трофимов А.М.* Основы аналитической теории развития склонов. Казань: Изд-во КазГУ, 1974. 212 с.
3. *Поздняков А.В., Ройхваргер З.Б.* Математическая модель развития склона при вязко-пластическом смещении обломочного материала // Геоморфология. 1980. № 4. С. 54–60.
4. *Трофимов А.М., Московкин В.М.* Математическое моделирование в геоморфологии склонов. Казань: Изд-во КазГУ, 1983. 218 с.
5. *Howard A.D.* Badland morphology and evolution: interpretation using a simulation model // Earth surface processes and landforms. 1997. V. 22. P. 211–227.
6. *Chant de L.J., Pease P.P., Tchakerain V.P.* Modelling alluvial fan morphology // Earth Surface Processes and Landforms. 1999. V. 24. P. 641–652.
7. *Iida T., Okunishi K.* Development of hillslopes due to landslides // Zeitschrift fur geomorphologie, Supp. 46. 1983. P. 67–77.
8. *Бермант А.Ф., Араманович И.Г.* Краткий курс математического анализа. М.: Наука, 1969. 735 с.
9. *Смирнов В.И.* Курс высшей математики. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. 1962. Т. 1. 478 с.
10. Сборник задач по дифференциальной геометрии / Ф.С. Феденко. М.: Наука, 1979. 272 с.
11. <http://iflorinsky.narod.ru/dtm.htm>
12. *Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З.* Численные методы анализа М.: Наука, 1967. 368 с.
13. *Demek J.* Cryogenic processes and the development of cryoplanation terraces // Biuletin Peryglacjalny. 1969. № 18. P. 115–125.
14. *Ананьев Г.С.* Динамическая геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1976. 173 с.
15. Карта новейшей тектоники Северной Евразии. М-б 1:5000000 / А.Ф. Грачев. М.: ОИФЗ РАН, 1997.
16. Морфоструктура и морфоскульптура гор и общие закономерности строения рельефа СССР. М.: Наука, 1986. 193 с.
17. *Чичагов В.П.* Аридные подгорные равнины и их организованность // Геоморфологические системы. Свойства, иерархия, организованность. М.: Медиа-ИРЕСС, 2010. 520 с.
18. *Mabbutt A.* Pediment land forms in Little Namaqualand, South Africa // The Geographical Journal. 1955. V. 121. № 1. P. 77–83.
19. *Strahler A.N.* Quantitative analysis of watershed geomorphology // Trans. Am. Geophys. Union. 1957. V. 38 (6). P. 913–920.
20. *Кинг Л.* Морфология Земли. М.: Прогресс, 1967. 559 с.

3-d CINEMATIC MODEL OF SLOPE EVOLUTION

V.VAD. BRONGULEYEV

Summary

3-d cinematic model demonstrates different landforms evolution under the action of slope processes. Different types of morphological control on slope degradation rate were analyzed. Including three morphological characteristics into model – gradient, vertical curvature, and horizontal one – enables to describe different types of relief development and elucidate some peculiarities of landforms morphology.

Horizontal curvature may effect notably the shape of developing landforms. Its influence consists in graduation of surface ribs, flattening of summits, pedimentation at the foot of salient hemianticline shaped parts of landforms. The role of horizontal curvature in graduation of planar ribs of relief is analogue to that of vertical curvature in destruction of profile steps.

Some features of pedimentation were simulated: joint of pediments having different base levels, “concave” relief formation, convergence of forms during slopes regression.

УДК 551.4.01→551.312.321(100.4)

© 2011 г. **В.И. МОЗЖЕРИН**, **В.В. МОЗЖЕРИН**

МИРОВОЙ СТОК ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ: ЕГО ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Введение

Известно более 30 оригинальных оценок глобального стока взвешенных наносов, полученных разными методами и основанных на исходных данных разного объема. Неодинакова и принятая в расчетах площадь периферийных, имеющих сток в океан, участков суши (от 86 до 134 млн. км²). Даже если не учитывать первые оценки стока наносов конца XIX и начала XX вв. (А. Гейки, М. Рид, А. Пенк, Х. Твенховель и др.) из-за явной неполноты и во многом случайности исходных материалов, то все равно обращает внимание очень большой разброс величин глобального стока (табл. 1, рис. 1). Неоднократно предпринимались и попытки их сопоставления; одна из последних таких попыток, наиболее полная по объему, принадлежит А.В. Панину [1–3].

Оценки глобального стока взвешенных наносов согласно данным таблицы 1 варьируют в очень широких пределах – от 5.2 до 51.1 млрд. т/год, или от 39 до 456 т/км² × год. Средняя арифметическая величина мирового стока, рассчитанная по 32 значениям, составляет немногим более 19 млрд. т/год. Есть несколько причин различий в оценках: 1) неодинаковый объем исходных данных по постам и разное количество постов (нередко пространственное несовпадение в размещении постов); 2) различные периоды учета стока по одним и тем же рекам; 3) разные способы экстраполяции имеющихся данных на неизученные области; 4) неодинаковая учтенная площадь периферийной суши, не охваченной непосредственными наблюдениями.



Рис. 1. Существующие оценки глобального стока взвешенных наносов (по А.В. Панину [32] с изменениями) Цифры соответствуют порядковым номерам в таблице 1. Пунктирная линия – положение средней арифметической величины приведенных оценок