

УДК 551.4.013

© 2016 г. В. ВАД. БРОНГУЛЕЕВ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И ЭКЗОГЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ СКЛОНА, СЛОЖЕННОГО НЕОДНОРОДНЫМ СУБСТРАТОМ

*Институт географии РАН, Москва, Россия
e-mail: geomorph@rinet.ru*

Облик форм рельефа, возникающего при одновременном действии эндогенных деформаций и экзогенных (денудационных) процессов существенно отличается от форм, образующихся при последовательном действии этих факторов. Методом кинематического моделирования анализируются случаи формирования сводового поднятия, сложенного неоднородным субстратом.

Расположенная на склоне продольная зона податливых пород при поднятии преобразуется в ущелье (ложбину) с узким выходом, как в случае косоугольного поднятия, так и блокового. Пока поднятие блока относительно базиса эрозии продолжается, в устьевой части ложбины будет сохраняться V-образный профиль. Этот вариант развития часто встречается во многих молодых горных странах (Копетдаг, Гималаи и др.). После прекращения поднятия ложбины расширяются, приобретая в сечении корытообразную форму, а у подножия склона возникает расширяющаяся ступень – педимент. При поднятии блока с твердой вертикальной дайкой возникает гребень и формируется пологий склон. По завершении поднятия гребень отступает вместе со склоном, сохраняя свою форму.

При плавном поднятии купола с неоднородным слоем (в реальности соответствует откапыванию дайки из-под рыхлых пород), часть купола редуцируется до небольшого останца, а под жестким слоем возникает крутой уступ, опирающийся на конический пьедестал, вырабатываемый в податливых породах. Но, если в поднимающемся блоке присутствует не более прочный, а более податливый горизонтальный слой, то поверхность поднимающегося блока преобразуется из сферической в коническую.

Ключевые слова: кинематическое моделирование, взаимодействие тектонических деформаций и экзогенного разрушения, эволюция форм рельефа.

Введение

В работе [1] о кинематическом моделировании развития некоторых форм рельефа рассмотрены случаи формирования локальных морфоструктур, сложенных однородным субстратом, при одновременном действии тектонических деформаций и экзогенного разрушения склонов, выражающегося в сочетании процессов параллельного отступления, профильного и планового выполаживания склонов. Было показано, что разрушение склонов, происходящее одновременно с эндогенными деформациями поверхности и с сопоставимой скоростью, приводит к образованию форм, заметно отличающихся от тех, которые возникли бы при последовательном действии указанных процессов, т.е. при быстром формировании тектонической формы и дальнейшем экзогенном ее разрушении.

Также предметом анализа было формирование литогенных форм рельефа, возникающих в результате избирательной денудации морфоструктур [2]. При этом мы ограничились разбором эволюции этих форм в условиях тектонического покоя. В качестве исходных рассматривались тектонические формы, сложенные неоднородным субстратом, но еще не преобразованные экзогенными процессами. Результаты моделирования показали, что важную роль в процессе образования литогенных форм играют такие факторы, как соотношение прочностей различных пород, составляющих субстрат рельефа, первичная морфология неоднородностей, время протекания процесса, а также характер разрушения склонов: относительные вклады процессов параллельного отступления склонов и их выполаживания.

Данная работа посвящена разбору более сложного случая одновременного действия эндогенных деформаций и разрушения форм, сложенных неоднородным субстратом. Представляет интерес, насколько сильно условие этой одновременности влияет на морфологию возникающих литогенных морфоструктур, в каких случаях и чем они отличаются от возникающих при последовательном действии эндогенных и экзогенных факторов.

Методика

Использованная методика кинематического моделирования подробно объяснена нами ранее [1–3]. Исходное уравнение, описывающее перемещение поверхности склона, имеет вид:

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

Здесь $\partial h/\partial t$ – скорость перемещения поверхности склона (снижению соответствуют отрицательные значения), $|\text{grad}h|$ – абсолютная величина градиента склона, $K_{\text{вер}}$ и $K_{\text{гор}}$ – вертикальная и горизонтальная кривизны поверхности склона, $f(x, y, t)$ – скорость тектонических движений, коэффициенты A , B и C пропорциональны вкладам в разрушение склона за счет его градиента и кривизны поверхности.

Изменения касаются лишь особенностей в данном случае более сложного задания неоднородностей субстрата. В ходе деформаций положение слоев различной прочности меняется со временем в соответствии со скоростью и характером тектонической деформации. Если при неподвижном субстрате присутствие, например, более прочного горизонтального слоя в некотором интервале высот (h_1, h_2) задается простым условием для коэффициента A (для B и C – аналогично), например, для скорости параллельного отступления склона:

$$A = A_1, \text{ если } h_1 < h(x, y, t) < h_2 \text{ и } A = A_2 \text{ в остальных случаях,} \quad (2)$$

где $h(x, y, t)$ – текущая высота поверхности склона в точке с координатами (x, y) , h_1 и h_2 – высоты нижней и верхней границ слоя, $A_1 < A_2$ – конкретные значения коэффициента A , то при перемещениях субстрата положение границ h_1 и h_2 будет зависеть от времени. Так, при простом блоковом поднятии аналогичное условие запишется следующим образом:

$$A = A_1, \text{ если } (Vt - h_1) < h(x, y, t) < (Vt - h_2), \text{ и } A = A_2 \text{ в остальных случаях.} \quad (3)$$

Здесь h_1 и h_2 – начальное положение границ жесткого слоя, V – скорость поднятия, t – время (продолжительность подъема). При наклонном поднятии, если его скорость линейно возрастает, например, по оси y от 0 у подножия склона при $y = 0$, до Vt при $y = L$, вместо выражения Vt в предыдущем условии должно стоять выражение $Vt(y/L)$, где L – заложение склона.

Если слой иной прочности залегает не горизонтально, а с наклоном относительно оси x , тангенс угла которого составляет k , а глубина относительно вершины свода, например, 18 и 15, то такое же условие будет выглядеть как:

$$A = A_1, \text{ если } (kx - 18 + t) < h(x, y, t) < (kx - 15 + t), \text{ и } A = A_2 \text{ в остальных случаях.} \quad (4)$$

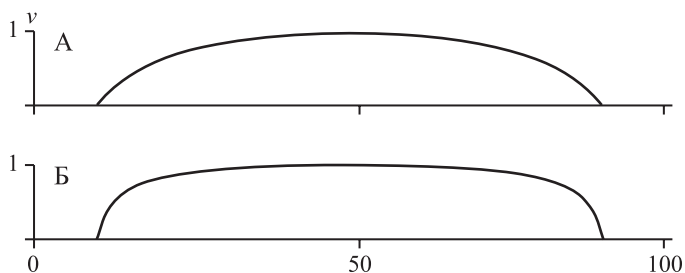


Рис. 1. Скорость поднятия свода, имеющего форму сферы с меняющимся радиусом. Последовательные положения границы полусферического купола, поднимающегося над горизонтальным нулевым уровнем (в плане). Радиус полусферы 35, скорость поднятия 1. Оси x и y пересекаются в т. (0.0). Цифры на оси x показывают расстояние (в условных единицах) и, одновременно, соответствуют тем моментам времени, для которых изображены границы купола (последовательность окружностей) от центра к периферии. Внешняя окружность соответствует моменту $t = 35$, v – скорость поднятия в центре свода

Более сложный случай – это сводовое поднятие неоднородного субстрата. В этом варианте величина поднятия зависит и от плановых координат x , y , и от времени t . Пусть растущий свод, имеющий в плане форму круга радиуса r , представляет собой сферический сегмент, так что его высота постоянно растет, а кривизна увеличивается вплоть до момента, когда радиус сферы становится равным радиусу окружности, а сферический сегмент превращается в полусферу. Возьмем скорость поднятия вершины свода постоянной и равной v . Тогда скорость поднятия поверхности свода в каждой точке (x, y) будет разницей двух последовательных положений сферической поверхности с меняющимся радиусом, разделенных интервалом времени Δt , отнесенную к этому интервалу, и вычисляться по формуле:

$$- \left[\frac{v^2(t - \Delta t)}{4v^2(t - \Delta t)^2} - (x - x_0)^2 - (y - y_0)^2 - \frac{v^2(t - \Delta t)^2 + r^2}{2v(t - \Delta t)} \right], \quad (5)$$

Здесь t – время, прошедшее с начала процесса, x_0 и y_0 – координаты оси сводового поднятия на плоскости xy , r – радиус области поднятия на плоскости xy . Распределение скорости по площади меняется в зависимости от времени, прошедшего с начала деформации. На рис. 1 показаны профили функции $f(x, y, t)$ в моменты времени $t = 20$ и $t = 30$ при $r = 40$.

Для этого случая условие существования первоначально горизонтального, но постоянно деформирующегося более прочного слоя, будет выглядеть следующим образом: если $t_1 f(x, y, t) < h(x, y, t) < t_2 f(x, y, t)$, то $A = A_1$, если это условие не выполняется, то $A = A_2$. Здесь $A_1 < A_2$ и $t_1 < t_2$ – два момента времени, определяющие мощность этого слоя; в центре поднятия она равна $v(t_2 - t_1)$.

И только если литологическая неоднородность представлена вертикальной дайкой, ее положение будет определяться пространственными координатами x и y и при вертикальном поднятии не будет зависеть от времени.

Когда условие существования неоднородного включения или тектонических деформаций задается не на всей рассматриваемой плоскости (x, y) , а в какой-то ее части, то кроме неравенств (1) – (3) необходимо задать еще пространственные границы этой подобласти. Для простого прямоугольного блокового поднятия эти границы могут быть заданы условиями: $x_1 < x < x_2$ и $y_1 < y < y_2$, (6)

где x_1 , x_2 , y_1 и y_2 – координаты границ такого блока. Если блок имеет куполовидную

(полусферическую) верхнюю поверхность, то эти условия будут выглядеть несколько сложнее:

$$((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2) < (2R_0t - t^2), \quad (7)$$

где x_0 и y_0 – координаты вершины купола на плоскости, R_0 – радиус купола. Неравенство (7) отвечает требованию, чтобы точка с координатами (x, y) все время находилась внутри той части купола, которая поднялась выше нулевого уровня и горизонтальный радиус которой увеличивается по мере роста структуры от 0 до R_0 . Графически это условие проиллюстрировано на рис. 1.

Рассмотрим теперь некоторые варианты развития таких литологически неоднородных морфоструктур под одновременным действием тектонических деформаций и экзогенного отступания склонов.

Модели развития некоторых тектолитоморфных морфоструктур

Поднятие блока с вертикальной ослабленной зоной. Базис эрозии простирается вдоль правой горизонтальной оси (рис. 2) и остается на постоянном нулевом уровне. В интервале значений $28 < y < 32$ в поперечном направлении протягивается зона пород меньшей прочности, чем окружающие (ослабленная зона). Весь блок размером 100×60 поднимается со скоростью $V=1^1$ до момента времени $t = 30$, после чего поднятие останавливается, но склоны продолжают отступать.

Пусть скорости отступания склонов в основном массиве блока будут определяться следующими значениями коэффициентов: $A_1 = 1$, $B_1 = 0.1$, $C_1 = -0.3$. В пределах ослабленной зоны примем значения коэффициентов равными $A_2 = 2$, $B_2 = 0.1$, $C_2 = 0$. Таким образом, скорость отступания склонов в ослабленной зоне в два раза больше, чем вне ее. Небольшие отличные от нуля значения коэффициентов B и C введены для большей устойчивости решения и совершенно не влияют на основной результат. Последовательные стадии такого процесса показаны на рис. 2. В процессе поднятия блока благодаря отступанию формирующегося уступа происходит формирование склона, обращенного к продольному (вдоль правой оси) базису, и поперечной V-образной ложбины вдоль ослабленной зоны. Угол этого склона и боковых склонов ложбины определяется коэффициентом A_1 , а угол продольного профиля ложбины – коэффициентом A_2 . Для примера, на рис. 2Г показана поперечная ложбина, сформировавшаяся к моменту $t = 30$ (т.е. как и на рис. 2Б) при увеличении A_2 в 4 раза. Продольный склон и высота блока практически не меняются, но ложбина прорезает поднимающийся блок на значительно большую длину, чем в тот же момент времени на рис. 2Б.

Пока продолжается поднятие блока, формирующийся продольный склон опирается непосредственно на продольный базис эрозии (рис. 2А, Б). Начиная с того момента, когда поднятие прекращается, у подножия этого склона, который по-прежнему продолжает отступать, возникает постепенно расширяющаяся горизонтальная ступень-педимент (рис. 2В). Ее ширина (как и угол продольного склона) зависит от коэффициента A_1 . Так, на рис. 2Д показан результат развития формы, аналогичный изображенному на рис. 2В, но при $A_1 = 0.5$. В этом случае во время поднятия формируется более крутой продольный склон, а затем у его подножия – более узкий педимент.

Самая интересная особенность такого развития состоит в том, что пока продолжается одновременное поднятие блока относительно продольного базиса и снижение склонов, поперечная ложбина на всем своем протяжении, в том числе и в устьевой ча-

¹ Соответствие модельных единиц реальным определяется заданием их пространственного и временного масштабов, исходя из здравого смысла или дополнительных условий задачи. Если считать пространственную единицу в модели равной, например, 1 м, а временную – 1000 лет, то модельная скорость равная 1 будет соответствовать реальной скорости движений (скорости отступания склона или тектонической деформации) равной 1 мм/год; если за временную единицу принять 100 лет, той же реальной скорости будет соответствовать модельная равная 0.1 и т.п.

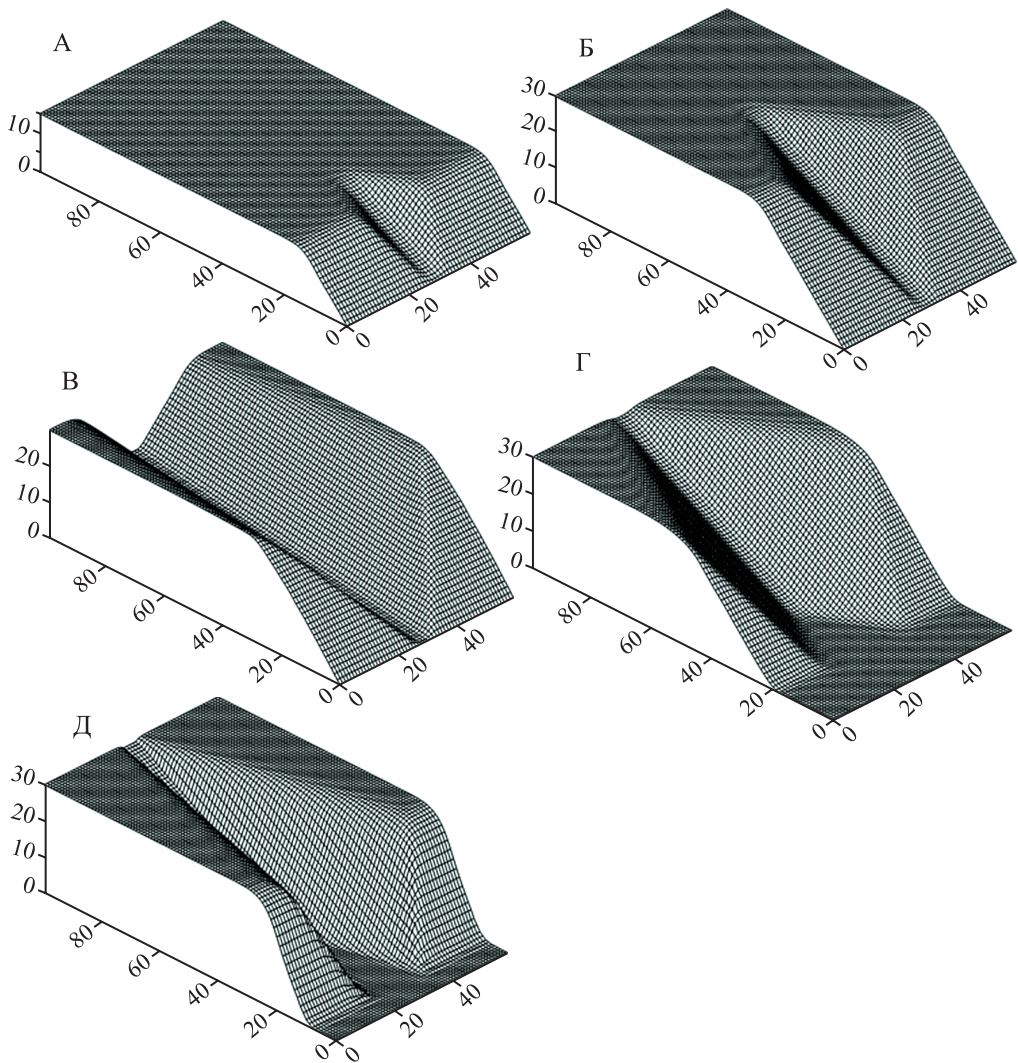


Рис. 2. Поднятие и одновременное разрушение блока с ослабленной поперечной зоной
 А–В – стадии процесса, соответствующие моментам модельного времени $t = 15, 30, 50$; Г – соответствует стадии В, но при вчетверо меньшей прочности пород поперечной ослабленной зоны; Д – соответствует стадии В, но с меньшей скоростью отступления склонов за пределы ослабленной зоны (см. пояснения в тексте)

сти, сохраняет V-образный профиль, ширина дна которого определяется только шириной ослабленной зоны. Но после прекращения поднятия (или, что в данном случае аналогично прекращению врезания продольной долины) ложбина, начиная с ее устья, расширяется и приобретает в сечении корытообразную форму. Приустьевые склоны ложбины отступают, как и основной продольный склон, и педимент, формирующийся у подножия последнего, проникает внутрь ложбины, образуя ее плоское днище.

На рис. 3 можно видеть примеры ложбин с узким устьем, свидетельствующем о продолжающемся опускании базиса эрозии этих ложбин.

Поднятие блока с твердой вертикальной дайкой. Гребень, соответствующий такой дайке, возникает сразу же вместе с формированием самого наклонного склона. Его протяженность вкрест простирания склона растет одновременно с длиной склона (рис. 4А, Б).

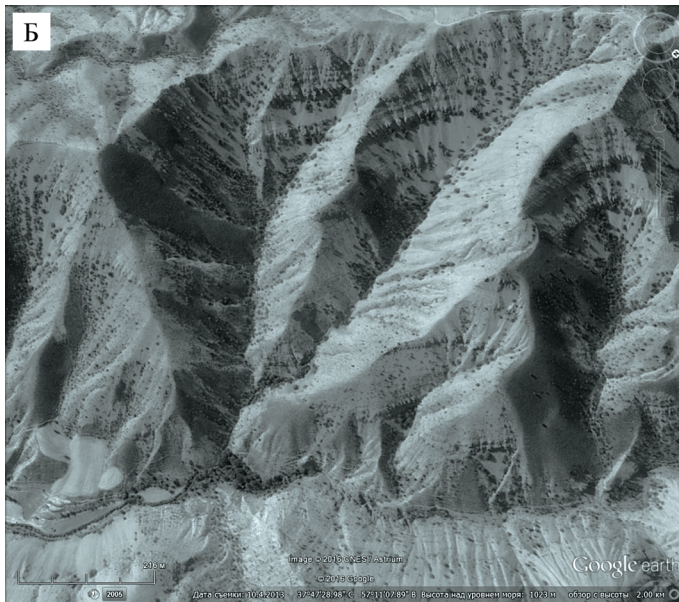
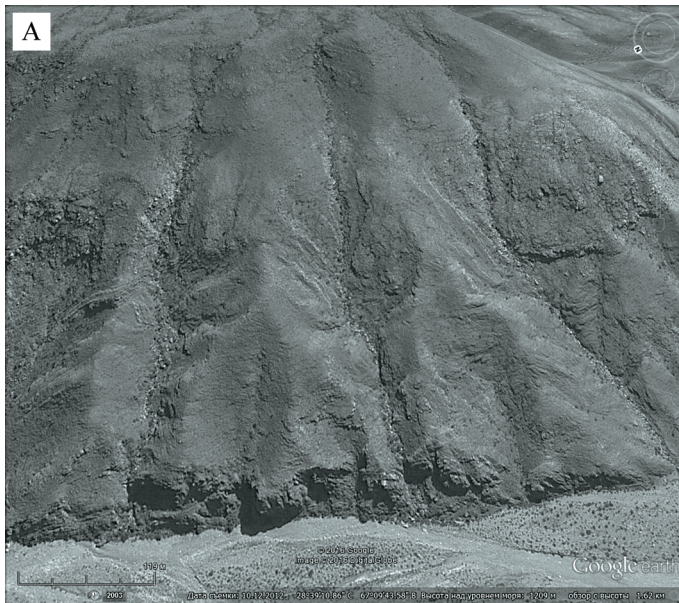


Рис. 3. Примеры ложбин с узким устьем

А – хребет Киртхар (Пакистан) (Google, 2012), Б – хребет Копетдаг (Иран) (Google, 2013)

По завершении поднятия гребень отступает вместе со склоном, сохраняя свою форму. На расширяющемся горизонтальном подножии склона на некотором протяжении сохраняется выступ дайки, постепенно выполаживающийся до полного исчезновения (рис. 4В). Этот этап развития практически идентичен описанному ранее отступанию склона с линейной дайкой в условиях тектонического покоя (см. [1, рис. 5]). На нижнем и верхнем краях дайки она оказывается срезанной, и пока склон короткий, форма гребня заметно отклоняется от линейной, что особенно заметно при большой разнице в прочности пород дайки и основного склона. Это хорошо видно на рис. 4Г, где скорость отступления склонов гребня в два раза меньше, чем на рис 4Б, В, и, соответственно, высота гребня больше, а склоны круче.

Если рассматривать **наклонно** поднимающийся блок с более прочной поперечной (к простиранию склона) дайкой, то образующаяся форма оказывается как бы наложением двух полученных ранее: гребня на склоне без тектонического поднятия [1] и косо поднятия однородного склона [2]. В этом случае возникает слегка вогнутая поверхность с гребнем, протягивающимся по всей длине склона вплоть до самой низкой, субгоризонтальной его части. Этот результат показан на рис. 5А. Стадия формирования соответствует моменту $t = 30$ (поднятие еще не прекратилось). На рис. 5Б мы видим результат развития склона при существовании на нем поперечной ослабленной зоны. Здесь $t = 60$ (поднятие к этому моменту продолжается); внутри слабой зоны, занимающей интервал $28 < y < 32$, $A = 2$, вне зоны – $A = 1$. Так же как и в случае простого блокового поднятия, при наклонном устье образующейся ложбины остается узким, пока это под-

Рис. 3. Примеры ложбин с узким устьем
 В – Гималаи (Китай) (Google, 2016)

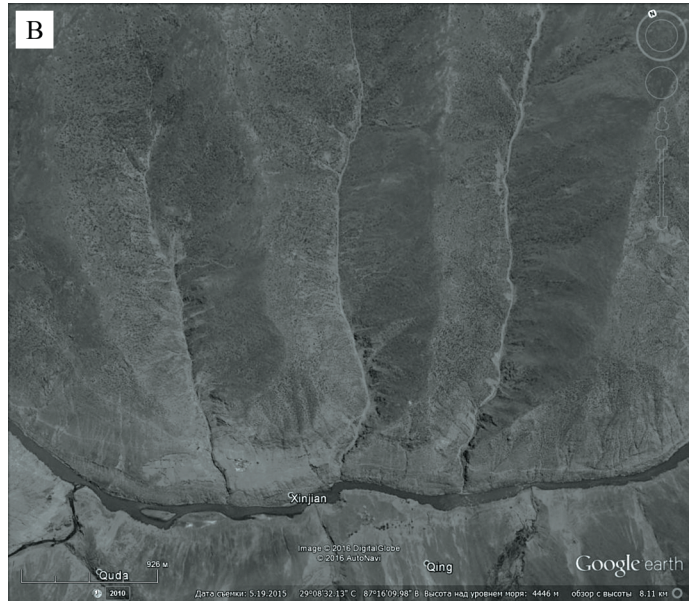
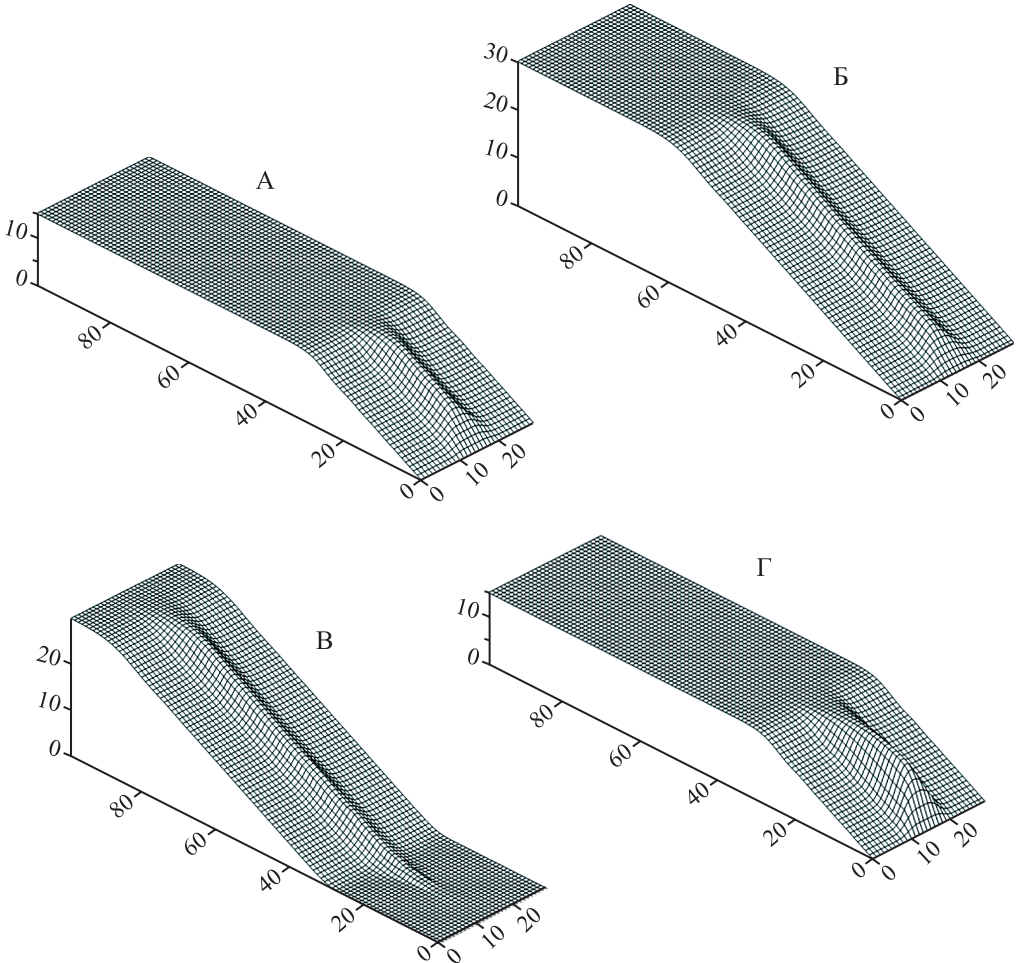


Рис. 4. Поднятие блока с твердой вертикальной дайкой
 А–В – стадии процесса, соответствующие моментам времени $t = 15, 30, 45$. При $t = 30$ поднятие прекращается. Вертикально залегающий слой пород повышенной прочности занимает интервал $10 < y < 20$. Внутри и вне этого интервала значения коэффициента A равны, соответственно, 1 и 2, коэффициенты B и C везде равны 0. Γ – аналог А при условии, что для дайки коэффициент $A = 0.5$



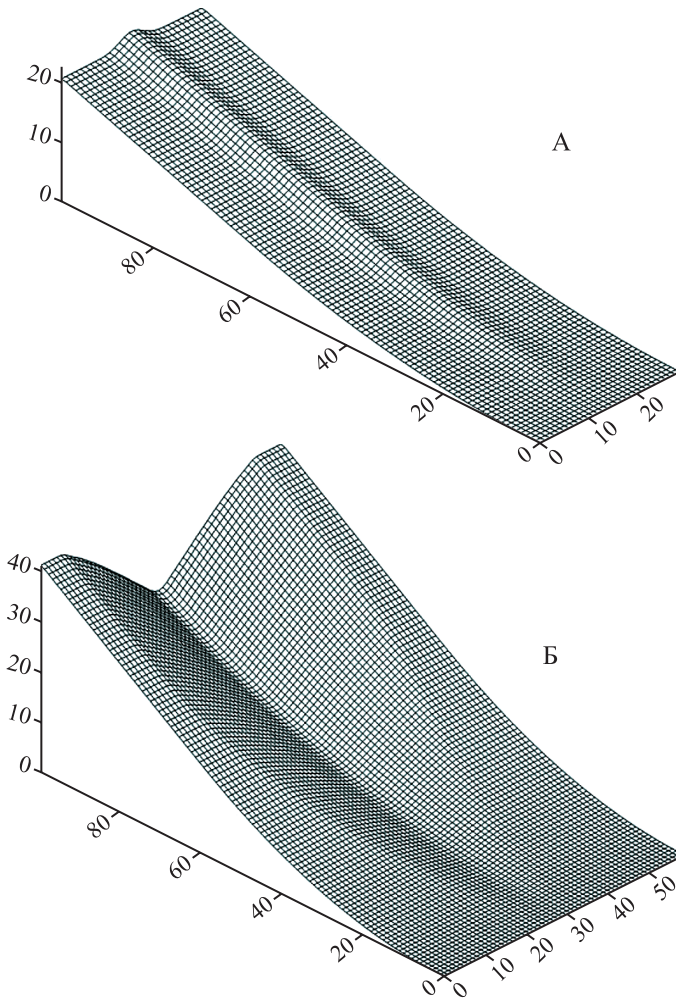


Рис. 5. Наклонное поднятие с прочной дайкой (А) и с ослабленной зоной (Б) (см. объяснения в тексте)

нятие продолжается (что и показано на рис. 5Б), а после его прекращения у подножия склона развивается горизонтальная площадка, и устье ложбины расширяется. Продольный профиль образующегося гребня, так же, как и ложбины, повторяют вогнутость основного склона.

Блоковое поднятие купола с неоднородным слоем. В этом случае предполагается поднятие блока – купола с полусферической внешней поверхностью. При этом диаметр поднятия в плане постепенно увеличивается до диаметра этой полусферы, после чего поднятие прекращается (как это хорошо видно из рис. 1). В реальности такой случай может соответствовать, например, откапыванию более прочной дайки из-под рыхлых

пород, поверхность которых служит при этом базисом для разрушения склонов дайки, причем уровень базиса понижается. Сама дайка предполагается неоднородной с горизонтальным слоем повышенной или пониженной прочности на некотором уровне.

Рассмотрим вначале вариант с более прочным слоем. Пусть сам купол имеет радиус поверхности 48 (в условных модельных единицах), кровля более жесткого горизонтального слоя залегает на глубине 7 единиц от поверхности, а сам слой имеет мощность 3 единицы. По мере поднятия купола, в момент времени $t = 7$ более прочный слой достигнет нулевого уровня и в дальнейшем будет подниматься все выше. Положение такой структуры (в профиль) при поднятии ее за 15 модельных единиц времени при скорости $V = 1$ и при отсутствии экзогенного разрушения склонов показано на рис. 6А. Горизонтальные линии, проходящие на уровнях $Z = 6-8$, показывают положение более прочного слоя в момент $t=15$.

Зададим скорости отступления склонов дайки в соответствии с выражением (2) следующим образом:

$A = 0.1$, если $(Vt - 9) < h \leq (Vt - 7)$, и $A = 1$ в остальных случаях, а коэффициенты B и C положим равными 0. При таком соотношении коэффициентов развитие неоднородного купола будет происходить следующим образом.

Последовательные стадии процесса показаны на рис. 6Б–Ж. За первые 10 единиц времени купол поднимается на 10 пространственных единиц, а прочный слой ока-

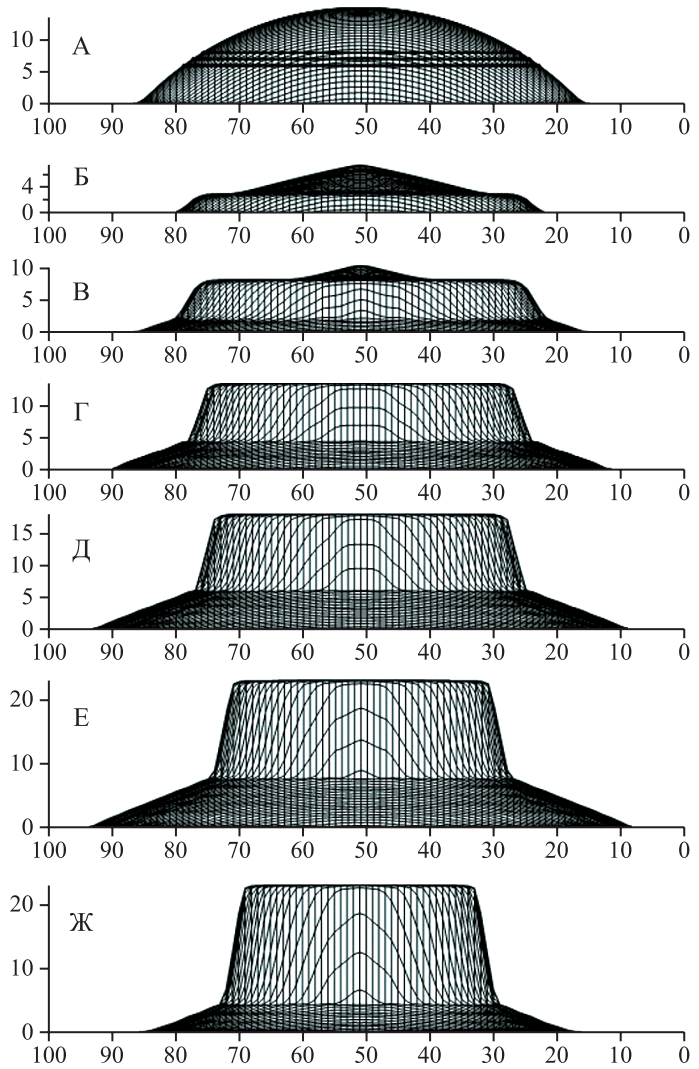
Рис. 6. Поднятие круглого блока с полусферической поверхностью и прочным горизонтальным слоем

А – при отсутствии экзогенного отступания склонов, соответствует моменту модельного времени $t = 15$; жирные горизонтальные линии показывают положение прочного слоя; Б–Ж – стадии одновременного поднятия и разрушения блока, соответствующие моментам времени $t = 10, 15, 20, 25, 30$ и 35

жется на высоте 3 единицы (рис. 6–П). Верхняя часть купола, сложенная податливыми породами ($A = 1$), разрушается путем отступания склонов, причем твердый слой ($A = 0.1$) служит как бы базисом, и по его поверхности начинает формироваться горизонтальная ступень. Склоны верхней части оказываются спрямленными (как это и должно происходить для неподвижной относительно базиса формы [4]). К моменту времени $t = 15$ верхняя часть редуцируется до небольшого останца, а под жестким слоем возникает крутой уступ, опирающийся на конический пьедестал, вырабатываемый в податливых породах (рис. 6В).

Поскольку скорость разрушения бронирующего слоя мала, и он сохраняется на протяжении всего времени блокового поднятия, медленно сужаясь, то по мере продвижения поднятия высота образующегося круглого уступа за счет снижения пьедестала растет, а диаметр уменьшается (рис. 6Б–Е). Пьедестал, формирующийся из периферических участков блока, поднимающихся выше нулевого уровня, расширяется (рис. 6В–Е), пока продолжается поднятие. Пусть в момент $t = 30$ поднятие прекращается; после этого размеры пьедестала начинают быстро уменьшаться, а опирающийся на него крутой уступ продолжает сужаться, как это видно из рис. 6Ж, соответствующего моменту времени $t = 35$.

Несколько иная картина возникает, если в теле поднимающегося блока присутствует не более прочный, а наоборот, более податливый горизонтальный слой. Пусть все характеристики предыдущего случая остаются прежними, за исключением того, что для всего блока $A = 1$, а для менее прочного слоя $A = 2$. Три последовательных момента развития такой растущей формы показаны на рис. 7. Поверхность поднимающегося блока в целом преобразуется из сферической в коническую, как это и должно быть для однородного блока с полусферической поверхностью. Но когда мягкий слой



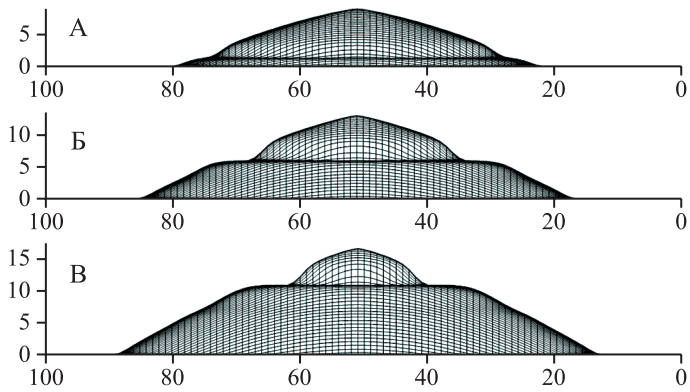


Рис. 7. Поднятие круглого блока с полусферической поверхностью и горизонтальным слоем пониженной прочности А–В – стадии процесса, соответствующие моментам модельного времени $t = 10, 15, 20$

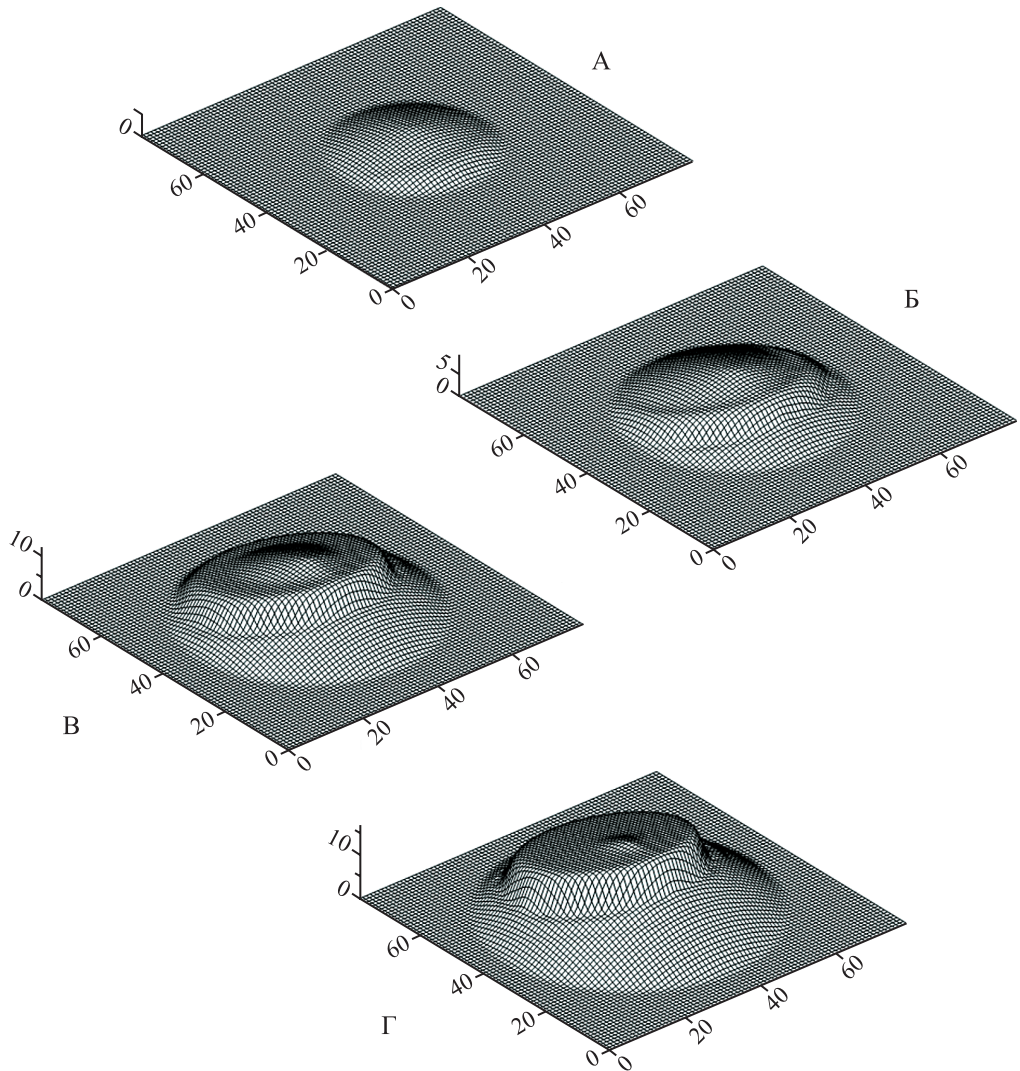


Рис. 8. Поднятие круглого блока с полусферической поверхностью и наклонно расположенным слоем повышенной прочности А–Г – стадии процесса, соответствующие моментам модельного времени $t = 5, 10, 15, 20$; радиус поверхности блока 35

поднимается выше нулевого уровня, он начинает быстро разрушаться, отступая по поверхности подстилающих более прочных пород. В этом случае крутой уступ образуется в самом этом слабом слое (относительно маломощном), а вышележащие породы как бы бронируют его. Высота уступа и ширина окружающей его горизонтальной ступени изменяются незначительно (они тем больше, чем больше мощность слабого слоя) и перемещаются вверх вместе с поднимающимся блоком.

Рассмотрим, в заключение, другой вариант роста куполовидной структуры, внутри которой более прочный слой расположен не горизонтально, а с наклоном. Радиус поверхности купола составляет 35, скорость поднятия и соотношения коэффициентов те же, что и на рис. 6, но положение прочного слоя задается немного сложнее. Условие (5) остается без изменений, а наклон слоя с коэффициентом $A = 0.1$ по оси x обеспечивается выполнением неравенства (8), в чем легко убедиться, подставляя в него различные значения x .

$$A = 0.1, \text{ если } (0.25x - 18 + t) < h(x, y, t) \leq (0.25x - 15 + t) \\ \text{и } A = 1 \text{ в остальных случаях} \quad (8)$$

На рис. 8 показаны результаты развития такой структуры.

Заключение

Приведенные примеры, конечно, не охватывают всех случаев образования рельефа, возникающего при одновременном действии эндогенных и экзогенных (денудационных) процессов. Но мы надеемся, что предлагаемый нами метод кинематического моделирования применим не только в случаях, рассмотренных в данной работе, но и во многих других. На перспективность кинематического моделирования указывает большое сходство облика получаемых моделей с реальными формами рельефа. Он позволяет объяснить ряд черт современного рельефа, например, наличие узких устьев у некоторых долин и дать прогноз дальнейшего развития рельефа. Хочется добавить, что метод кинематического моделирования применим и для решения “обратной задачи” – восстановления исходных параметров рельефа, например, существовавшего до начала поднятия территории. Эти разработки могут найти применение не только в теоретической геоморфологии, но и на практике – от инженерно-геологических работ до прогноза поисков полезных ископаемых (сохранность коренных месторождений, россыпей и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бронгулеев В. Вад.* Кинематическое моделирование развития литогенных форм рельефа // Геоморфология. 2014. № 2. С. 3–13.
2. *Бронгулеев В. Вад.* Взаимодействие эндогенных и экзогенных процессов при росте локальных морфоструктур // Геоморфология. 2013. № 1. С. 3–11.
3. *Бронгулеев В. Вад.* Двухмерная кинематическая модель образования подгорной лестницы // ДАН. 2008. Т. 422. № 7. С. 1097–1100.
4. *Бронгулеев В. Вад.* Некоторые особенности развития ступенчатых склонов: результаты кинематического моделирования // Геоморфология. 2009. № 2. С. 3–11.

Поступила в редакцию 24.05.2016

INTERACTION OF TECTONIC UPLIFT AND EXOGENOUS DESTRUCTION OF A SLOPE COMPOSED OF NON UNIFORM SUBSTRATES

V. Vad. BRONGULEYEV

Institute of Geography RAS, Moscow, Russia
e-mail: geomorph@rinet.ru

Summary

Landform morphology created by combined action of endogenous deformations and exogenous (denudation) processes depends on whether these forces performed concurrently or in succession in this study, different formation scenarios for a tectonic arch composed of heterogenous substrates are analyzed based on kinematic modeling techniques.

Following the start of the uplift, a lengthwise zone of softer rocks is being transformed into a gorge with a narrow outlet either in case of tectonic tilt and vertical (block) elevation. V-shaped cross-section is being preserved in the outlet as long as the elevation above base level increases. This scenario is valid for many young alpine regions such as Kopet Dag, Himalaya, etc. After the uplift has been finished, gorges start to widen and become trough-like in cross section, and a progressively widening step starts to form at the base of the arch slope (a pediment). In a block that contains a hard vertical dyke, a gently sloping crest is formed following the uplift start. After the uplift cessation, the crest preserves its form retreating together with the whole arch slope.

Slow elevation of an arch containing a hard horizontal layer results in transformation of the upper part of the arch into a small spherical remnant. At the side of the hard layer, a steep cliff forms that passes below into a conical pedestal produced by denudation in softer rocks. In case if the arch contains a softer horizontal layer the surface of the raising block evolves rather to conical than to spherical form.

Keywords: kinematic modeling, interaction of tectonic uplift and denudation, landform evolution.

doi:10.15356/0435-4281-2016-4-3-14