

А. М. ТРОФИМОВ

ПРОСТРАНСТВЕННО-КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ СКЛОНОВ Ф. АНЕРТА

Развитие теории и практики моделирования в геоморфологии по мере расширения предметно-содержательной сферы столкнулось с рядом специфических трудностей. Возникающие противоречия между острой необходимостью в содержательной формализации геоморфологических представлений и неспособностью математического моделирования реализовать их привело к созданию новых подходов, развивающих данную проблему. К ним можно отнести системный подход в геоморфологии [1, 2], построение концептуальных моделей [3], морфодинамический анализ [4], математико-географическое и геоситуационное моделирование [5] и др. Одним из наиболее перспективных и имеющих особую научно-практическую значимость является разработанное немецким геоморфологом Ф. Анертом системное моделирование в геоморфологии склонов.

Центральной идеей разработок Ф. Анерта является синтез положений геосистемной парадигмы, общих положений принципов моделирования гео- и морфосистем (морфолитосистем) и развивающейся в геоморфологии системы моделей экзогенного и эндогенного рельефообразования.

То обстоятельство, что системный подход является в геоморфологии основой для разработки моделей, в настоящее время сомнению не подлежит. В работах Ф. Анерта развивается представление о взаимосвязи моделирования и системного подхода. Последнее обстоятельство способствует выходу научного направления на новую ступень, повышает их теоретическую значимость и практическую эффективность. Подобный синтез позволил не только значительно увеличить масштабы решаемых геоморфологических задач (с повышением значимости результатов и их качества), но и вполне естественно вписать в процесс исследования информационные системы, компьютерное моделирование и подготовил почву для использования в геоморфологических исследованиях различного ранга экспертных систем.

В учении о системном моделировании в геоморфологии склонов Ф. Анерт использует особую логику конструирования прогнозных моделей. Она выражается в разработке процесса конструирования пространственно-концептуальных моделей развития склонов (моделей типа «процесс—ответ»). Эти идеи Ф. Анерта зародились давно и отчетливо прослеживаются в его ранних работах. Еще в одной из проблемно-обзорных работ о месте и природе физической географии в англо-саксонских странах [6] отмечаются два основных направления, по которым должна, по его мнению, развиваться геоморфология склонов — морфометрический анализ и как следствие результатов анализа — оценка динамических состояний.

Дальнейшие разработки привели к осознанию того, что процесс построения качественной теории моделирования склонов (пространственно-концептуальных моделей) включает три этапа: статистически-морфометрический, динамический, пространственно-концептуальный (модель типа «процесс—ответ»), логическая упрощка результатов которых по сути и составляет учение о системном моделировании склонов.

Первоначальные исследования Ф. Анерта связаны с разработкой графических (двумерных) моделей развития склонов [7] и построением на этой основе кинематических моделей [8]. Рассматриваются отдельные склоновые участки (единицы), характер их сочленения и проводится попытка подбора адекватных им склоноформирующих процессов. Таким образом, уже на начальных этапах кинематическим моделям придаются некоторые аспекты динамических характеристик. Уже этот этап анализа материала допускает широкое использование компьютерной техники [9].

Как бы увязывая в единую систему различные элементарные единицы

(формы) склонов и описания процессов, приводящих к их изменениям, Ф. Анерт [10] развивает концепцию динамического равновесия между различными компонентами единого геоморфологического процесса. Идея его заключается в том, что существующая в природе тенденция к установлению динамического равновесия отражается в геометрии рельефа.

В любой точке склонов покровные отложения состоят из материала, транспортируемого из вышележащих частей склонов (A), и материала, поставляемого выветриванием в данной точке (W). Учитывая величину денудационного сноса (R), можно составить уравнение $C' = C + A + W - R$, где C — начальная мощность отложений, C' — конечная мощность отложений.

Склон находится в денудационном равновесии при $R = A + W$ (если $W > 0$). При этом происходит понижение поверхности. Если покров наносов имеет такую мощность, что выветривание прекращается ($W = 0$), то наступает равновесие $R = A$. В этом случае понижение поверхности не происходит. Любые изменения R , A и W могут быть причиной изменения мощности отложений и, следовательно, нарушения динамического равновесия. При этом определенным типам равновесия и дисравновесия отвечают определенные формы склонов. Если в основании склона $R < A$ (положительное дисравновесие), то происходит аккумуляция и формируется вогнутость. При $R > A$ (отрицательное дисравновесие) увеличивается уклон и образуется выпуклость. Любые изменения форм отражают стремление к восстановлению динамического равновесия. Указанная система, по мнению Ф. Анерта, позволяет познать как пространственную дифференциацию форм и процессов, так и их смену во времени.

Принцип динамичности в теории системного моделирования Ф. Анерта реализуется путем использования описанной выше равновесной концепции [10, 11] в комплексной модели развития склона [12]. Для этого была построена на языке ФОРТРАН программа COSLOP-2. Она состоит из основной программы, служащей для выбора подпрограмм и обращения к ним, пересчета основных параметров, вывода на печать и 17 подпрограмм: три для задания начального профиля склона, одна — для определения выветривания, с учетом геологической структуры (две подпрограммы), причем расчет выветривания может вестись по квазимеханической, химической и смешанной моделям, шесть подпрограмм для расчета изменения базиса денудации склона с постоянной, замедленной или возрастающей скоростью, три подпрограммы склоновых процессов — вязкопластического течения по известной формуле Р. Суше [13], простого смыва (через синус угла) и сложного смыва также по известной формуле А. Зинга [14], две подпрограммы, моделирующие оползневой механизм соответственно левой и правой частей склона.

Моделирование на компьютере Univac-1103 показало, что развитие первоначально прямолинейного склона под действием вязкопластического течения приводит к выпуклому профилю склона; сложного смыва — к вогнутому профилю; сочетание первых двух процессов — к выпукло-вогнутому склону; действие вязкопластического течения с учетом постоянной скорости понижения базиса денудации склона — к выпуклому устойчивому профилю; сложного смыва с учетом постоянной скорости понижения базиса денудации склона — к вогнутому устойчивому профилю.

Дальнейшее развитие комплексной модели явилось основой для последующего построения пространственно-концептуальной модели [15, 16] и анализа чувствительности профиля склона к изменению силовых характеристик [17, 18]. Однако прежде чем перейти к характеристике пространственной модели типа «процесс—ответ», необходимо обратить внимание на появление ряда работ Ф. Анерта иной ориентации, которые, казалось бы, не связаны напрямую с подходом к реализации системной динамики рельефа.

Результаты, получаемые в процессе моделирования, являются удовлетворительными только в том случае, если они, во-первых, основываются на действительных исходных данных и, во-вторых, если они, опять-таки, могут быть сопо-

ставлены с натурными данными, определенным образом измеренными и полученными. Поэтому Ф. Анерт вынужденно обращается к глубокой разработке теории измерения и эксперименте в геоморфологии [19]. Исследования в этой области расширяются, и работы Ф. Анерта в этот период становятся преимущественно метрическими, морфометрическими, статистическими [20]. Здесь, в частности, обсуждаются также проблемы соотношения и значимости количественных и качественных характеристик [21], а порою прослеживается увлечение просто описательными качественно-количественными параметрами [22, 23].

Необходимо подчеркнуть, однако, что в еще более ранних работах [24, 25] автор уже проводит достаточно детальный функциональный анализ между процессами денудации, рельефом и экзогенными процессами как взаимосвязанными и взаимозависимыми с поиском формализующих их уравнений равновесия, включающих, помимо основных переменных, устойчивые параметры рельефа [26, 27]. Все это явилось как бы исходной предпосылкой для перехода к комплексной пространственной модели описания динамических состояний рельефа.

На базе рассмотренных выше моделей и подходов Ф. Анертом была создана пространственная модель, отражающая дифференциацию процессов в виде системы «процесс—ответ», которая может полностью включать не только единый сегмент, профиль склона и т. п., а либо речной бассейн в целом, либо какой-то иной цельный комплексно организованный ареал [15]. На языке ФОРТРАН с идентификатором SLOP 3D [15, 16] была составлена программа, включающая: а) первоначальную поверхность, обеспеченную литологическими и структурными различиями в отношении устойчивости к выветриванию и инфильтрации; б) процессы выветривания; в) изменение базиса эрозии; г) перемещение по склону продуктов выветривания и тем самым форму поверхности. Эта измененная поверхность затем действует как исходная для следующего этапа выветривания, изменения базиса эрозии и перемещения материала. Каждая такая последовательность представляет собою шаг развития модели.

Первоначальная поверхность состоит из точек прямоугольной системы координат (еще раз отметим, что это может быть реальный речной бассейн, либо какой-нибудь иной ареал), имеющих фиксированную высоту. Изменение формы поверхности в результате развития отображается изменениями этой фиксированной высоты.

Структурные и литологические различия вводятся с помощью различных геометрических уравнений для границ между слоями различных пород. Кроме того, программа модели позволяет включать несколько зон вертикальной трещиноватости любой ширины и ориентации. Таким образом, модель территории по возможности максимально приближается к реальной. Выветривание в каждой определенной точке поверхности модели зависит от устойчивости горных пород и мощности перекрывающего обломочного материала. Программа модели допускает комбинации из любых типов, описанных выше в исходной модели и в любой пропорции. Этим достигается представление широкого диапазона климатических и литологических условий.

Эрозия может быть постоянной, ускоряющейся или замедляющейся. Фактически изменение базиса эрозии соответствует разнице между заданным снижением базиса и поступлением обломочного материала со склона за счет денудации.

Денудация программируется в основном как перенос материала из точки в точку. Среди процессов в модель включены: капельно-дождевая эрозия, размыв, пластическое течение, вязкое течение и оползание обломков в результате местного увеличения крутизны. Моделируются они как раздельно, так и в любом сочетании в зависимости от реального хода развития рельефа; кроме того, они моделируются в соответствии с результатами эмпирических и теоретических исследований широкого круга специалистов.

Вывод результатов осуществляется через равные промежутки времени тре-

буемых параметров. Это могут быть высоты рельефа, выходы коренных пород, мощности обломочного материала, скорости выветривания, скорости денудации и т. п. Причем данные располагаются таким образом, что облегчается картирование логических изолиний [15, 16, 28, 29, 30]. Это позволяет автору получать ряд различных целей, в том числе и операционных, экспресс-карты, операционные карты, карты- и отклики», фоновые, остаточные и другие виды эвристических карт (см. например, [16, 31]).

Практическая польза от подобных работ несомненна. Исследования служат как бы количественной мерой проверки правильности гипотез о характере связи между формой и процессом («процесс—отклик») и для геоморфологической системы в целом с ее механизмом внутренних и внешних взаимодействий. Они могут быть использованы для оценивания эволюции склонов на протяжении геологически коротких промежутков времени и, наконец, в качестве модели интенсивности проявления современных экзогенных процессов (в том числе и для сугубо прагматических целей — использования земель в сельском хозяйстве, при строительстве дорог, различных сооружений и т. п.).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кашменская О. В.* Теория систем и геоморфология. Новосибирск: Наука, 1980. 120 с.
2. *Якименко Э. Л., Порядин В. С., Маковская Н. С.* Два тренда поверхности рельефа. Новосибирск: Наука, 1986. 143 с.
3. *Тимофеев Д. А., Трофимов А. М.* О сущности и месте системного подхода в геоморфологии // Геоморфология. 1983. № 4. С. 37—41.
4. *Ласточкин А. Н.* Морфодинамический анализ. Л.: Недра, 1987. 256 с.
5. *Трофимов А. М.* К проблеме прогнозирования в геоморфологии // Геоморфология. 1985. № 3. С. 24—28.
6. *Ahnert F.* Some reflections on the place and nature of physical geography in America // The prof. Geogr. 1962. V. XIV. P. 1—7.
7. *Ahnert F.* Zur Frage Rückschreitenden Denudation und des Dynamischen Gleichgewichts bei morphologischen Vorgängen // ERDKUNDE. 1954. B. VIII. Lfg. 1. S. 61—64.
8. *Ahnert F.* Quantitative Models of Slope Development as a Function of Waste Cover Thickness // 20th IGC. Abstracts of Papers. L., 1964. P. 118.
9. *Ahnert F.* Zur Rolle der Elektronischen Rechenmaschine und ges Mathematischen Modelles in der Geomorphologie // Geogr. Zeitschrift. 1966. № 54. H. 2. S. 116—133.
10. *Ahnert F.* The role of the equilibrium concept in interpretation of landform of fluvial erosion and deposition // L'Evolution des Versants. Macar (Ed.). Liege, 1967. P. 23—24.
11. *Анерт Ф.* Трехмерная теоретическая модель развития формы рельефа // Международная география. Т. 1. Геоморфология и палеогеография. М., 1976. С. 233—236.
12. *Ahnert F.* COSLOP-2.A. comprehensive model program for simulating slope profile development // Geocom. Program: L., 1973. № 8. P. 1—24.
13. *Souchez R.* Viscosité, plasticité et rupture dans l'évolution des versants // Ciel et Terre. 1964. V. 80. № 11—12. P. 389—410.
14. *Zingg A. W.* Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff // Agr. Engin. 1940. V. 21 (40). P. 59—64.
15. *Ahnert F.* Darstellung Strukturen in Flüssen auf die Oberflächenformen im theoretischen Modell // Z. Geomorphol. 1976. Sup. Bd. 24. P. 11—22.
16. *Ahnert F.* Brief description of a comprehensive three-dimensional process-response model of landform development // Z. Geomorphol. 1976. Sup. Bd. 25. P. 29—49.
17. *Moon P.* The sensitivity of Ahnert's slope development model to variations in slope forming parameters // S. Afr. Geogr. J. 1975. V. 57. № 2. P. 111—117.
18. *Ahnert F.* Discussion of B. P. Moon «On the validity of a comprehensive slope development model» // Z. Geomorphol. 1978. Sup. Bd. 22. № 3. P. 360—364.
19. *Ahnert F.* A note on measurements and experiments in geomorphology // Z. Geomorphol. 1980. Sup. Bd. 35. P. 1—10.
20. *Ahnert F.* Stone rings random walks // Transactions, Jap. Geomorphol. Union. 1981. № 2. P. 301—312.
21. *Ahnert F.* Über die Beziehung zwischen quantitativen, semiquantitativen und qualitativen Methoden in der Geomorphologie // Z. Geomorphol. 1981. Sup. Bd. 39. S. 1—28.
22. *Ahnert F.* Local relief and the height limits of mountain ranges // Amer. J. of Sci. 1984. V. 284. P. 1035—1055.
23. *Ahnert F.* Die erste internationale Konferenz für Geomorphologie vom 15. bis 21. September 1985 in Manchester // Die Erde. 1986. № 117. S. 85—87.
24. *Ahnert F.* A comparison of theoretical slope models with slopes in the fields // Z. Geomorphol. 1970. Sup. Bd. 9. P. 88—101.

25. *Ahnert F.* Functional relationships between denudation, relief, and uplift in large mid-latitude drainage basins // *Amer. J. of. Sci.* 1970. V. 268. P. 243—263.
26. *Ahnert F.* Slope process and slope forms: a theoretical study // *Intern. Geography.* Montreal, 1972. V. 1. P. 3—5.
27. *Ahnert F.* Relief and denudation: theoretical test of an empirical correlation // *Intern. Geography.* Montreal, 1972. V. 2. P. 1029—10.
28. *Ahnert F.* An approach to the identification of morphoclimates // *Intern. Geomorphol.* 1986. V. 2. P. 159—188.
29. *Ahnert F.* Approaches to dynamic equilibrium in theoretical simulations of slope development // *Earth Surf. Processes.* 1987. V. 12. P. 3—15.
30. *Ahnert F.* Modelling landform change // *Modelling Geomorphol. Systems.* A. G. Anderson Ed. Chapter 13. 1988. P. 375—399.
31. *Ahnert F.* Some comments in a theoretical model // *Earth Surf. Processes.* 1977. V. 2. № 2—3. P. 191—201.

Казанский государственный университет

Поступила в редакцию
17.IV.1989

SPATIAL CONCEPTUAL MODELS OF SLOPE DEVELOPMENT WORKED OUT BY F. AHNERT

TROFIMOV A. M.

Summary

The system modelling in the slopes' geomorphology developed by F. Ahnert is a synthesis of fundamentals of the geosystem's paradigm, general principles of geo- and morphosystems (morpho-lithosystems) modelling and a system of models of exogenic and endogenic relief formation which is now in the process of development. On the basis of this approach F. Ahnert constructed a spatial model which presented the processes differentiation as a system of «process — response» type, which can include not only a single element of slope relief, but any drainage basin as a whole or any other area organized in a structural entity.