

УДК 551.4.01

КЛЕНОВ В. И.

К МЕТОДИКЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ РЕЛЬЕФА

Разработка методики моделирования на ЭВМ процессов развития рельефа необходима для анализа воздействия на рельеф различных пространственно-временных режимов ведущих экзогенных и эндогенных факторов. Как известно, действие эндогенных факторов проявляется в деформациях земной коры, а также в изменении скоростей тектонических движений во времени. Действие экзогенных факторов проявляется прежде всего в формировании и развитии речной сети, обеспечивающей эрозию, аккумуляцию и вообще перемещение твердого вещества по поверхности Земли, т. е. в преобразовании деформированной тектонически-ми движениями земной поверхности. Задача состоит в разработке имитационных моделей, позволяющих шаг за шагом наблюдать развитие рельефа при одновременном действии основных рельефообразующих факторов, при различных пространственно-временных режимах этих факторов [1]. В данном случае задача моделирования развития рельефа включает анализ эволюции речной сети, определение путей и объемов перемещения наносов по земной поверхности. Ее решение требует большого объема расчетов, с чем и связано использование ЭВМ. В дальнейшем будут изложены основные элементы метода моделирования развития эрозионного рельефа, основанные на вычислении объемов и баланса наносов, а также будет приведен пример моделирования.

Основной подход заключается в вычислении последовательности текущих состояний рельефа (включая структуру речной сети), начиная с некоторого начального состояния, при заданном пространственно-временном режиме тектонических движений и одного из главных климатических факторов — водности. На модели реализуется представление, что атмосферные осадки, поступающие на земную поверхность, формируют речную сеть, структура которой зависит от пространственного распределения уклонов и определяет направления потоков наносов.

В соответствии со спецификой численного моделирования на ЭВМ, рельеф представляется в дискретном виде, т. е. в виде матрицы, состоящей из элементарных участков поверхности (квадратов), каждому из которых соответствует своя абсолютная высота. Упорядоченная во времени последовательность этих матриц R_i , где i — временные интервалы, описывает развитие рельефа. Принимается, что границы матрицы могут быть двух типов: либо «водораздел», через который движение водных потоков и вообще обмен веществом не происходит, либо «базис эрозии», поглощающий потоки вещества. Форма матрицы, а также пространственное распределение границ различных типов, вообще говоря, могут быть произвольными. В частности, матрица, границы которой представляют собой базис эрозии, — есть «остров». В противоположном случае, если все границы — водоразделы, матрица представляет собой «замкнутую впадину». В нашем случае будут рассмотрены квадратные матрицы, три стороны которых — водоразделы, а четвертая — уровень «приемного бассейна», и относительно него исчисляются абсолютные высоты всех элементов матрицы. Итак, начальное состояние модели определяется заданной в соответствии с конкретной задачей матрицей высот.

Эндогенные (тектонические) воздействия задаются с помощью упорядоченной во времени последовательности матриц T_i , имеющих ту же размерность, что и матрица R_i . Экзогенные воздействия, т. е. объем

атмосферных осадков, поступающих на каждый элемент поверхности в данный интервал времени, имитируется с помощью последовательности «климатических» матриц K_i . Аналогичным образом может быть задана матрица, описывающая литологические неоднородности, зоны разломов. В более сложных вариантах могут быть учтены и другие факторы рельефообразования: колебания температур, потери на испарение и т. д. Итак, первый этап моделирования состоит в задании матрицы начального состояния рельефа R_1 , а также соответствующих матриц эндогенных и экзогенных воздействий (T_1, K_1 и др.). Матрица R_1 суммируется по элементам с матрицей T_1 : $R_1^* = R_1 + T_1$.

На следующем этапе производится определение структуры эрозионной сети в соответствии с формой исходной поверхности, деформированной тектоническими движениями (часть или даже все элементы матрицы T_1 могут быть нулевыми). Производится автоматическое кодирование структуры потоков в «генетический код», допускающий однозначное последующее считывание этой структуры. Операция эта производится с использованием сканирования матрицы R_1^* .

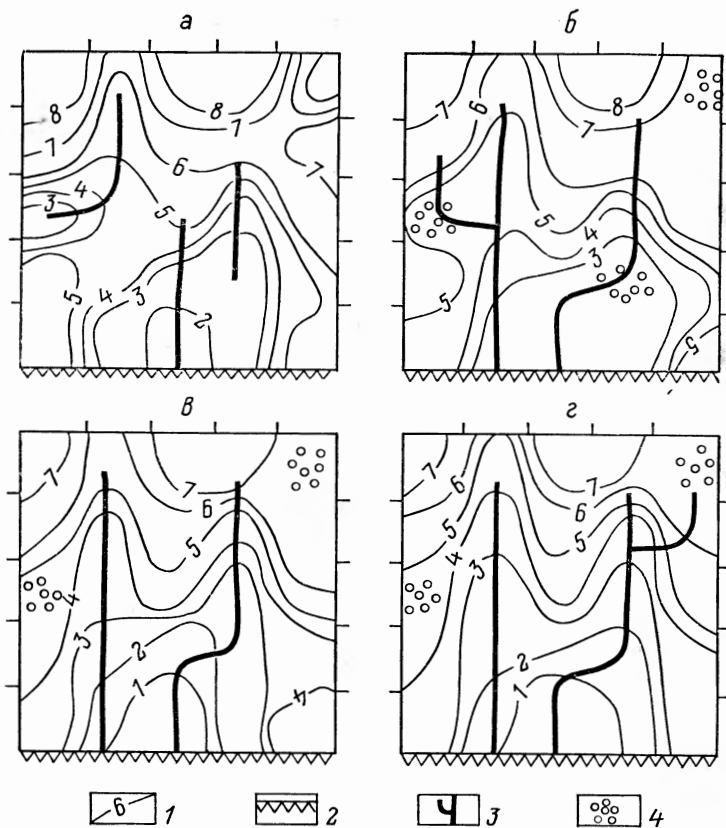
Далее следует этап функционирования, суть которого состоит в вычислении объемов потоков наносов от верхних звеньев речной сети к нижним за один временной интервал. Для иллюстрации работы модели на этом этапе достаточно рассмотреть баланс наносов на двух соседних участках тальвега. Сначала определяется уклон тальвега, зависящий от разности высот соседних элементарных участков. Далее определяется транспортирующая способность потока как функция водности и уклона [2]; $D = A Q^B I^C$, где Q — водность потока, определяемая площадью водосбора, опирающегося на данный элементарный участок, а также соответствующими значениями «климатической» матрицы; I — уклон; A, B, C — коэффициенты. Если $D > V_t$, где V_t — объем транзитных наносов, поступающих на верхний по течению участок с верхних звеньев речной сети, то подсчитывается дефицит наносов, поступающих на данный участок и определяющий объем денудации на данном участке: $V_d = D - V_t$, где V_d — объем денудации. Абсолютная высота участка при этом уменьшается в соответствии с объемом денудации на величину $\Delta h = V_d / S$, где S — площадь элемента матрицы, и заносится в матрицу текущего состояния P . Если же объем транзитных наносов превышает транспортирующую способность потока ($D < V_t$), то на этом участке происходит аккумуляция, объем которой соответствует избытку наносов: $V_a = V_t - D$, где V_a — объем аккумуляции. Новое значение абсолютной высоты заносится в соответствующий элемент матрицы P . При $D = V_t$ участок работает только на транзит, а значение V_t используется для вычисления баланса наносов на следующем по течению участке и т. д. Таким образом, за один временной интервал реализуется поток наносов на всей матрице R_1^* в соответствии со структурой потоков. В результате одного шага функционирования модели формируется новая матрица P — матрица текущего состояния. Последняя в свою очередь используется в качестве исходной на следующем шаге моделирования при новом значении i , а также при новых значениях тектонических и климатических воздействий.

Алгоритм моделирования эволюции рельефа включает в себя, таким образом, следующую последовательность операций:

1. Ввод начального состояния матрицы высот R_i и матрицы тектонических воздействий T_i , при $i = 1$. Производится суммирование $R_i^* = R_i + T_i$. При $i > 1$ производится ввод матрицы R_i путем перезаписи последней из матриц текущего состояния P . Формируется матрица R_i^* с использованием новых тектонических воздействий (T_i).

2. Операция распознавания структуры речной сети, суть которой сводится к считыванию матрицы R_i^* с применением сканирования. Производится кодирование структуры потоков («генетический код»), обеспечивающее однозначное считывание этой структуры на следующем этапе.

3. Функционирование модели, включающее вычисление баланса наносов вдоль всех линий стока, приводящее к изменениям высот элементарных участков, т. е. к формированию матрицы текущего состояния



Схемы развития эрозийного рельефа (по результатам математического моделирования). *а* — начальное состояние модели, *б*—*г* — состояния модели, соответствующие 3-, 7- и 10-му временным интервалам; 1 — изогипсы (в условном масштабе), 2 — базис эрозии, 3 — структура потоков, 4 — участки повышенной мощности аллювия

модели рельефа. Для вычисления объемов наносов используется «климатическая» матрица K_i . С формированием новой матрицы высот P заканчивается цикл моделирования.

4. Увеличение значения i , переход к пункту 1. Длина последовательности временных интервалов определяется конкретной задачей. В процессе вывода результатов моделирования на печать (или на другое внешнее устройство ЭВМ) выводится последовательность матриц текущего состояния P , отражающих развитие модели эрозийного рельефа.

Приведем пример моделирования эволюции рельефа, заданного в виде матрицы высот размером 5×5 элементов (рисунок). Начальное и некоторые из последующих состояний модели для наглядности изображены в изолиниях, хотя не следует забывать, что матрицы высот выдаются в цифровом виде. В качестве начального состояния имитируется поверхность, наклонная к базису эрозии и деформированная случайным полем высот. Распределение атмосферных осадков предполагается равномерным и во времени также не меняется. Предполагается также отсутствие тектонических деформаций (все элементы матриц T_i равны нулю). Два последних уровня связаны с тем, что цель эксперимента состоит в наблюдении за процессом самоорганизации [3], т. е. за эволюцией речной сети при заданном начальном состоянии *а*.

При анализе последовательности состояний (*б* — при $i=3$, *в* — при $i=7$, *г* — при $i=10$) можно видеть, что в процессе развития модели происходит упорядочивание (самоорганизация) структуры бассейнов. Совокупность отдельных, не связанных потоков, опирающихся большей частью на замкнутые впадины, эволюционирует в два относительно крупных речных бассейна, опирающихся на общий базис эрозии. Увеличивается глубина долин. В то же время отдельные фрагменты «древне-

го» рельефа, т. е. остатки исходной поверхности, сохраняются на водоразделах в течение всего времени эксперимента, погребенные под наносами. Одной из причин наблюдаемых перестроек структуры потоков является неравномерное врезание (уменьшение высот элементов матрицы и изменение ее структуры). Другая причина — образование локальных участков аккумуляции при наличии относительно низких водоразделов между соседними бассейнами. На модели отмечается также регрессивное смещение «волн» врезания и локальной аккумуляции вдоль долин.

В дальнейшем предполагается увеличение размерности «матрицы рельефа», что увеличит разрешающую способность модели, повысит детальность структуры речной сети, позволит имитировать различные пространственные структуры в условиях меняющихся тектонического и климатического режимов. В заключение можно предложить примерный круг задач, в решении которых может участвовать модель развития эрозийного рельефа:

1) анализ различных вариантов эволюции морфоструктур при заданных режимах и пространственном распределении тектонических и климатических факторов; 2) изучение самоорганизации рельефа, включая выявление критериев самоорганизации; 3) использование модели в задачах реконструкции истории рельефа, т. е. зависимости его современного строения от начального состояния и режима учтенных факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кленов В. И. Использование имитационных моделей речной долины в задачах геоморфологии и палеогеографии.— Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 1983, № 4, с. 70.
2. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 348 с.
3. Эбслинг В. Образование структур при неравновесных процессах. М.: Мир, 1979. 280 с.

Московский государственный
университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
14.II.1985

ON METHODS OF COMPUTER SIMULATION OF THE TOPOGRAPHY EVOLUTION

KLENOV V. I.

Summary

Computer simulation of the relief evolution consists of calculation of series of consequent states of land surface (spatial structure of drainage included) using sediment balance technique; both tectonic and climatic regimes assumed to be constant. Simulation algorithm includes the sequence of operations: input of the initial state of model as an altitude matrix and regimes of endogenous and exogenous influences; automatic deciphering and coding of the flows structure; the model functioning, i. e. matter exchange between all the sections of drainage net in accordance with their structure; formation of a new matrix of the topography which is used as the initial one for the next time interval. The model can be used to analyse morphostructures evolution or self-organization of topography and to trace the history of landforms.