

**МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 551.4.012

КЛЕНОВ В. И.

**К МЕТОДИКЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ  
ИСТОРИИ РЕЛЬЕФА**

Ряд прикладных задач геоморфологии: поиск россыпных и коренных месторождений полезных ископаемых, оценка тектонической активности горных территорий в связи с их сейсмичностью, выявление режима рельефообразующих факторов и тенденций развития рельефа — требует полной и точной реконструкции хода эволюции рельефа. Один из главных резервов реконструкции — выявление и заполнение «белых пятен» истории рельефа, возникающих вследствие полного или частичного уничтожения геоморфологических «реперов», т. е. ранее сформировавшихся форм рельефа и рыхлых отложений, постоянно или периодически действующими процессами денудации.

Как известно, процессы денудации (эрозионные, склоновые и др.) доминируют в пределах горных территорий, приводя в ходе эволюции речных долин к уничтожению большей части ранее образовавшихся террас и их отложений. Наличие во многих речных долинах переуглубленных участков, иногда со значительной мощностью рыхлых отложений, принципиально дела не меняет: именно их приуроченность к днищам долин и к нижним частям склонов создает пробелы информации о режиме формирования большей части эрозионного вреза. Полевые исследования и моделирование на ЭВМ процессов формирования террасовых комплексов речных долин [1] показывают, что закономерные потери информации имеют место как в пределах террасовых комплексов, так и в переуглубленных участках долин. Вопрос о полноте отображения истории в отложениях межгорных впадин здесь не рассматривается, поскольку пока не имеется хотя бы приближенной математической модели эволюции геоморфологической системы «межгорная впадина — горное обрамление». В данном случае объект анализа — верхнее звено этой системы, а именно речные долины и их террасовый комплекс, в отношении которых уже имеется определенный опыт моделирования на ЭВМ [2]. Имитация процесса эволюции долины, произведенная с вычислением баланса наносов в условиях воздействия двух главных факторов: тектонических движений и водности потока при заданном их пространственно-временном режиме, показала, что режим этих факторов сложно и неоднозначно отражается в эволюции и строении модели, в ее структуре. Последняя включает взаимное расположение основных элементов рельефа (днище долины, террасы, склоны), а также мощность аллювия. Как показало моделирование, любое изменение в заданном режиме экзогенных и эндогенных воздействий меняет структуру речного бассейна, форму продольного профиля и ширину днища. Внешний сигнал, который одновременно является и одним из рельефообразующих факторов, преобразуется собственной динамикой системы. В частности, становятся неоднозначными соотношения между колебаниями водности и террасообразованием. Колебания водности могут приводить к образованию террас, а могут и не приводить, и наоборот, террасы формируются и при отсутствии таких колебаний. Аналогично, т. е. через реакции всей системы, в ней преобра-

зуются и различные режимы тектонических поднятий, в том числе и дифференцированных.

В дальнейшем на базе этой модели будут рассмотрены возможности решения так называемой обратной задачи, которая формулируется так: на основе наблюдаемых данных о современном строении речной долины в целом восстановить ее историю с максимальной точностью и на максимальный срок, с постоянным шагом по времени. Обратные задачи часто относятся к некорректным [3], не имеющим однозначного решения. Сам процесс приближенного решения обратных задач сводится к построению математической модели природного процесса, эволюционной модели некоторого объекта и в дальнейшем сравнении характеристик модели с независимо полученными данными наблюдений. Неоднозначность решения обратных задач обусловлена неполнотой и недостаточной точностью исходных данных и самой модели, ее ограничениями.

Моделирование эволюции речной долины под воздействием заданного режима рельефообразующих факторов — «прямая» задача, которая может быть использована для прогноза эволюции рельефа. В обратной задаче данная модель должна быть существенно преобразована, в основном с целью реализации регуляризирующего алгоритма, дающего возможность сужения класса решений. Метод многократного «прямого» прогона модели с целью «подбора истории» под наблюдаемое состояние объекта (т. е. такой истории, которая позволила бы получить модель объекта, с заданной точностью сходной с реальным объектом) может быть использован лишь для весьма грубых оценок и проверки уже имеющихся гипотез об истории объекта. Главная задача «прямой» модели — изучение закономерностей динамики и эволюции речных долин при различных пространственно-временных режимах основных факторов. Именно многократное моделирование речной долины с различными режимами входных воздействий и с различными параметрами самой модели позволило установить основные свойства эволюции модели, дающие если не полную уверенность, то достаточно обоснованную надежду на существенное повышение полноты и точности реконструкции истории.

Наиболее важный для обратной задачи результат многократного прогона модели при различных режимах водности и тектонических движений, а также сравнения текущих и конечных состояний состоит в однозначном соответствии между историей и строением объекта. Любое внешнее воздействие, общее или локальное, длительное или кратковременное, экзогенное или эндогенное оказывает влияние на всю дальнейшую эволюцию модели и находит отражение в ее структуре. Если, например, две смоделированные на ЭВМ долины имеют идентичную историю внешних факторов, но в одной из них имело место импульсное тектоническое поднятие на каком-либо участке, то в конечном счете расширения днища и террасы на различных участках этих долин приобретают другие характеристики (ширину, протяженность, мощность аллювия и др.). Многократное моделирование показало отсутствие так называемой конвергенции, т. е. в данном случае идентичности структуры при различных вариантах истории. Иначе говоря, в структуре модели речной долины зафиксирована в неявном виде вся ее история, а также вся история экзогенных и эндогенных воздействий. Вопрос в том, как «расшифровать» эту историю.

Другой, но менее важный вопрос: отражает ли поведение модели, при котором информация о прошлых событиях не теряется, а фиксируется в структуре, поведение природных геоморфологических систем. В подтверждение того, что модель отражает особенности развития природных объектов, приведем один пример. В результате моделирования выявлен сложный режим образования и пространственного смещения долинных расширений. Режим их образования, уничтожения (через фазу образования локальной террасы) весьма неустойчив. В процессе моделирования наблюдалось как относительно стационарное положение расширений в течение ряда временных интервалов, так и их смещение вверх или вниз по долине, а также кратковременное существование на одном

участке долины и затем появление на другом и т. д. Аналогичная картина наблюдается, например, в долинах ряда интенсивно врезающихся притоков рек Алдан и Тимптон, расчленяющих поверхность Алданского нагорья. В «стационарных» расширениях участки современной аккумуляции окаймляются террасами и террасоувалами. Смещение расширений вверх или вниз по долине фиксируется соответствующим смещением участков расширений днища и аккумуляции относительно террас, расположенных соответственно ниже или выше по течению. Отмечаются также расширения, выраженные или только в современном днище, или на уровне одной из террас, находящиеся в разных стадиях сохранности. Представляется, что образование этих расширений обусловлено по существу стохастической динамикой речных долин.

Состояние модели речной долины в каждый последовательный временной интервал определяется набором характеристик днища и всех террасовых уровней: ширина, абс. высота над базисом эрозии, продольный уклон, мощность аллювия. Если представить эти характеристики как координаты  $n$ -мерного фазового пространства, то состояние системы в любой временной интервал отображается некоторой точкой этого пространства. Соответственно динамика и эволюция модели в серию последовательных временных интервалов изображаются последовательностью этих точек, т. е. фазовой траекторией. Можно построить проекции этих траекторий на какую-либо плоскость фазового пространства, например на плоскость «ширина днища — абс. высота днища» или «ширина днища — продольный уклон днища» и т. п. Построение по результатам моделирования траекторий поведения какого-либо участка долины во времени показало, что наряду с наличием определенной тенденции (тренда) система обнаруживает свойства случайного поведения: случайное блуждание с резкой сменой направления и величины перемещения репрезентативной точки. Таким образом, обнаруживается случайное поведение детерминированной модели, причем режим внешних воздействий вводился как случайными, так и детерминированными функциями. Любое изменение в режиме внешних воздействий полностью меняет фазовую траекторию. При этом положение репрезентативной точки в фазовом пространстве никогда точно не повторяется.

Последние исследования динамических систем [4] показывают, что случайное поведение является общим свойством систем с многомерным фазовым пространством. Именно поэтому независимо от результатов проведенного моделирования следует ожидать проявлений случайного поведения природных систем — речных долин. Как ни парадоксально, именно стохастический режим развития речных долин дает принципиальную возможность полной и однозначной реконструкции ее истории, разумеется, при наличии достаточно эффективной модели и отсутствии ошибок в исходной информации. Путь решения обратной задачи — своего рода проследивание фазовой траектории против хода времени, т. е. реализация процедуры пошаговой реконструкции истории от современного состояния системы. Поскольку прямой подбор длительной и сложной истории речной долины (включая и пространственно-временной режим рельефообразующих факторов) вряд ли реально возможен, необходимо преобразовать имеющуюся модель так, чтобы включить в нее некоторый регуляризирующий алгоритм, дающий устойчивое приближение к оптимальному (по заданному критерию) решению.

Предыдущие по времени, на величину выбранного временного интервала  $\Delta t$ , пространственные координаты днища долины, а также соответствующие внешние воздействия (объем стока, интенсивность тектонических движений и др.) будем в дальнейшем называть параметрами. Задача состоит в подборе этих параметров таким образом, чтобы «прямое функционирование модели от предыдущего состояния (от предыдущего шага по времени) к последующему привело к нему с достаточной точностью. Иными словами, необходимо подобрать вектор параметров таким образом, чтобы ошибка (различие между «опорным» и вычисленным последующими состояниями) лежала ниже заданных пределов. Это за-

дача оптимизации [5]. В нашем случае достижение минимальной ошибки оптимизации имеет значение меры точности реконструкции. На первом шаге производится автоматическая настройка вектора параметров предыдущего состояния ( $t_0 - \Delta t$ ). Далее реконструированное состояние принимается за исходное и относительно него настраиваются параметры, т. е. производится реконструкция, следующего шага по времени ( $t_1 - \Delta t$ ) и т. д. Такое решение последовательности задач оптимизации позволит получить функцию ошибок  $Q(t)$ , отражающую изменение точности реконструкции во времени. На каждом временном шаге производится полный цикл вычисления предыдущего состояния на протяжении всей долины (последовательности ее участков). При реализации этого алгоритма возможна реконструкция с точностью до заданного временного интервала не только состояний объекта, но и пространственно-временного режима тектонических движений в бассейне, режима водности. Реконструкция будет успешной только в том случае, когда реконструируется сразу все, т. е. ведущие рельефообразующие факторы.

Процедура отладки и практической реализации алгоритмов автоматизированной реконструкции должна иметь необходимый этап проверки «обратной» модели. Сначала производится «прямое» моделирование с заданным режимом учетных факторов. Полученное конечное состояние модели используется в качестве исходного для реконструкции. Целесообразность этого методического приема обусловлена уникальной для данной задачи возможностью сравнения реконструированного и заданного режима водности и тектонических движений, а также соответствующей последовательности состояний. Полученные при этом новые оценки точности реконструкции сопоставляются с функцией ошибки оптимизации  $Q(t)$ . Лишь после реализации этого этапа можно будет приступить к решению обратной задачи на конкретных объектах, когда на основе введенной в ЭВМ информации о современном строении конкретной долины на выходе будет получена реконструкция ее истории, сопровождаемая соответствующими значениями  $Q(t)$ .

Ожидается, что точность реконструкции в конечном счете будет зависеть не только от ошибок в исходных данных, но и от неизбежной и в целом заранее неизвестной неполноты модели, от ее ограничений, а также от неизбежной операции преобразования исходной информации к параметрам самой модели (от выбора интервала по времени и по пространству). Мера действия каждого фактора на точность реконструкции может быть установлена только на опыте. Последовательное подключение новых факторов позволит задействовать процедуру последовательного повышения точности и глубины реконструкции при условии использования достаточно мощной вычислительной техники. Из сказанного видно, что реализация решения обратной задачи достаточно сложна. В то же время перспективы, возникающие при ее успешном решении, трудно переоценить.

В заключение перечислим основные этапы реализации методики реконструкции истории эрозионного рельефа: 1) решение «прямой» задачи, т. е. разработка и реализация на ЭВМ эволюционной модели речной долины; 2) реализация алгоритма решения обратной задачи как последовательности прямых задач и задач оптимизации; 3) проверка процедуры решения обратной задачи путем сопоставления результатов «прямого» и «обратного» моделирования; 4) автоматизированная реконструкция истории реальных объектов, с одновременным получением функции ошибки оптимизации как меры точности реконструкции; 5) при недостаточной точности реконструкции, определяемой значениями функции ошибки оптимизации, в модель включаются новые факторы и производится переход к п. 1 и т. д.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кленов В. И. Исследование соотношений между строением и историей речных долин // Вестн. МГУ, сер. 5. Геогр. 1983. № 1. С. 84.
2. Кленов В. И. Опыт моделирования геоморфологических систем на ЭВМ // Геоморфология. 1985. № 4. С. 39.

3. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
4. Лоренц Э. Н. Детерминированное неперiodическое течение//Странные аттракторы. М.: Мир, 1981. С. 88.
5. Пешель М. Моделирование сигналов и систем. М.: Мир, 1981. 300 с.

Московский государственный университет  
Географический факультет

Поступила в редакцию  
5.III.1986

## ON THE METHODS OF AUTOMATIC RECONSTRUCTION OF THE RELIEF'S HISTORY

KLENOV V. I.

### Summary

River valley evolution model simulated by a computer is analysed and the conclusion drawn that the whole history of the geomorphic system (exogenous and endogenous relief-forming factors history included) is fixed implicitly in the structure observed. This property of the system behavior may be used for realisation of its automatic reconstruction algorithm. Main stages of the reconstruction technique realisation are discussed.

УДК 551.4.012 : 551.4.07

ФИЛАТОВ В. Ф.

## СТРАТИГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ФОРМ ПОГРЕБЕННОГО ДЕНУДАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА

Анализ погребенного рельефа, как известно, повышает эффективность поисков гипергенных и россыпных полезных ископаемых, некоторых типов ловушек углеводородов и месторождений, поиски которых ведутся по погребенным ореолам рассеяния. Из описанных в литературе методов задаче выявления форм погребенного рельефа наиболее полно отвечает метод реперных поверхностей, заключающийся в измерении кратчайших расстояний от поверхности несогласия до ближайшего сверху маркирующего горизонта [1]. Этот метод позволяет исключить влияние последующих тектонических дислокаций. Однако его применение ограничено необходимостью наличия в перекрывающей толще, вблизи поверхности несогласия, надежного маркирующего горизонта. Кроме того, поиски месторождений твердых полезных ископаемых обычно ведутся в условиях, когда перекрывающая толща невелика по мощности или полностью уничтожена денудацией. Прослеживание маркирующего горизонта при этом практически невозможно.

Известен также метод выявления форм погребенного рельефа, заключающийся в картографировании выходов на поверхность несогласия пород, отличающихся по возрасту от пород, слагающих ее в ближайшем окружении. При условии горизонтального залегания пород в период формирования поверхности несогласия такие участки соответствуют деструктивным отрицательным (в случае выхода более древних отложений на фоне более молодых) или положительным (при обратном соотношении) формам палеорельефа [1]. Однако этот метод не позволяет отличить выходы на поверхность несогласия отложений более древних на фоне более молодых, обусловленных наличием, например, эрозионных долин, от отложений, обусловленных срезанием положительных тектонических структур. Выходы на поверхность несогласия более молодых пород на фоне более древних могут быть обусловлены: существованием погребенной денудационной возвышенности; наличием более древней, чем выявляемый рельеф, отрицательной тектонической структуры, сре-