

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. А.И. ГЕРЦЕНА

HERZEN STATE PEDAGOGICAL UNIVERSITY OF RUSSIA

LXXVII Герценовские чтения
География:
развитие науки и образования

Материалы Международной научно-практической конференции
22–26 апреля 2024 года

В 2-х томах

II

LXXVII Herzen readings
Geography:
Development of Science and Education

Materials of the International Scientific and Practical Conference
on April 22–26, 2024

In 2 volumes

Санкт-Петербург
Издательство РГПУ им. А. И. Герцена
2024

Примечания редактора:

¹«Но сами системы множествами не являются». Любая система – это множество элементов плюс множество отношений. На элементах можно задать спектр топологий в диапазоне от тривиальной до дискретной. Среди всех отношений, образующих организацию системы, есть особо важные, инвариантные к допустимым преобразованиям и образующие ее структуру. Специфику системам придают именно отношения. На этом пути возникают классификации, пространства толерантности, структуры... Последние, кстати сказать, с отношениями строгого, нестрогого, квази-порядка и т. д. – *Прим. ред.*

²«В философском аспекте проблемы часть может быть больше целого». Более 100 лет назад Г. Кантор построил теорию бесконечных множеств и показал, что для них собственное подмножество может быть равномощно всему множеству. Но и для них часть не может превосходить целое. Кажется, авторы незаметно для себя перешли от геоэкологической системы к ее описаниям в параметрах, число коих «может расти сколько угодно», превысив число элементов системы, из чего и выросло логическое противоречие. – *Прим. ред.*

ЭВОЛЮЦИЯ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ РЕКИ

А.Ю. Сидорчук

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, fluvial05@gmail.com

THE RIVER LONGITUDINAL PROFILE EVOLUTION

A.Yu. Sidorchuk

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Аннотация. Проведено моделирование изменения во времени продольного профиля реки при врезании в горной стране для восходящего развития рельефа по В. Пенку и нисходящего по В. Дэвису. Учтено формирование террас врезания и уменьшение их количества во времени по экспоненциальному закону. Показаны различия морфологии речной долины при разном типе врезания реки и сложности в установлении этих различий в натуральных речных долинах.

Ключевые слова: уравнение деформации, восходящее и нисходящее развитие рельефа, врезание рек, формирование террас, сохранность террас

Введение

Сто лет назад В. Пенк [5] поставил задачу изучения образования рельефа с помощью количественного дифференциального метода. Примерно в это же время Ф. Экснер [7] записал дифференциальное уравнение деформации, основанное на законе сохранения вещества. Это математическая реализация дифференциального метода и основное уравнение геоморфологии.

Известны две модели развития рельефа при взаимодействии эндогенных и экзогенных процессов. Модель В. Дэвиса [1] (нисходящее развитие рельефа) предполагает (в упрощенном виде) быстрое тектоническое поднятие территории и последующее расчленение и понижение рельефа экзогенными процессами в состоянии тектонического покоя. Модель В. Пенка (восходящее развитие рельефа) предполагает одновременное действие тектонического поднятия и эрозионно-денудационных процессов расчленения и понижения рельефа. Обе модели можно реализовать с помощью уравнения деформации. Цель сообщения – сравнение расчетов по моделям В. Дэвиса и В. Пенка.

Метод

Будем анализировать изменения во времени t и пространстве x отметок z дна речного русла с помощью уравнения деформации [3]:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{W} \frac{\partial Q_s}{\partial x} + V_t \quad (1)$$

Здесь Q_s – объемный расход речных наносов $\text{м}^3/\text{с}$, W – ширина русла, м. Уменьшение расхода наносов по длине реки означает их аккумуляцию и повышение отметок дна, увеличение – эрозию и понижение отметок. Нулевой баланс расхода наносов означает стабильность дна. При тектонических движениях со скоростью V_t уравнение (1) есть математическая реализация модели В. Пенка, без этого члена – модели В. Дэвиса.

При врезании происходит размыв коренных пород в русле. Это возможно только в условиях высоких паводков, когда из-за мобилизации аллювия потоком обнажаются участки коренного дна. Тогда скорость снижения отметок дна пропорциональна уклону русла $-\frac{\partial z}{\partial x}$ и удельному расходу паводков q $\text{м}^2/\text{с}$ с учетом коэффициента абразии k_a (с размерностью $1/\text{м}$):

$$\frac{\partial z}{\partial t} = Hk_a q \frac{\partial z}{\partial x} + V_t \quad (2)$$

Здесь H – число Хевисайда: 1 если скорость потока U больше неразмывающей U_{cr} и 0 в обратном случае. Скорость потока рассчитывается по формуле Шези-Маннинга. Применяются морфометрические связи удельного расхода q и глубины потока D с максимальным расходом воды в половодье Q , равном произведению слоя стока M на площадь водосбора F .

$$q = 0.5Q^{0.3} \quad (3), \quad D = 0.8Q^{0.25} \quad (4)$$

Пусть в днище долины формируется пойма с максимальной высотой, равной высоте средних половодий над дном русла. По мере врезания дна пойма выходит из-под уровня затопления и формируется терраса врезания. В первом приближении, это происходит при врезании реки на данном участке на величину 0.5 максимальной глубины во время половодья D .

Формирование террас врезания сопровождается их уничтожением в ходе блуждания потока и склоновых процессов. В.И. Кленов предложил степенную зависимость с отрицательным показателем степени для функции вероятности сохранения террас от их высоты [2]. Данные по террасам р. Алабуги [4] позволили несколько изменить эту зависимость:

$$Z \frac{dp}{dh} = aK \exp\left(-a \frac{h}{Z}\right) \quad (5)$$

Здесь величина сохранности террас в створе $K = N/N_{pot}$; N – общее число сохранившихся в створе фрагментов террас, $N_{pot} = Z/h_{\Pi}$ – потенциальное число террас в створе, $dp = dN/N$ – плотность вероятности числа сохранившихся террас в диапазоне dh/Z на относительной высоте h , h_{Π} – средний перепад высот террасы и поймы при формировании террасы, Z – глубина вреза речной долины, выше которой террасы отсутствуют, a – дисперсия числа террас. Для условий р. Алабуги $a=3.59$, $K=0.1$. Так как (2) решается численно, нужно соблюдение условия устойчивости численной схемы (критерия Куранта) для гиперболического уравнения:

$$k_a q^* \frac{\Delta t^*}{\Delta x} \ll 1 \quad (6)$$

В членах (6) с индексом «*» учтен масштаб времени. Независимость (2) от него позволяет выбрать масштаб и шаг по времени так, чтобы продолжительность счета не была чрезмерной.

Результаты

В качестве горной страны (начальной для модели В. Дэвиса и конечной для модели В. Пенка) возьмем прямоугольный треугольник со стороной $X_{max}=90000$ м и высотой $Z_{max}=3000$ м, остальные характеристики $T_{max}=100 \cdot 10^{12}$ сек (около 3.5 млн. лет), $F_{max}=1490$ км², $M=0.28$ м³/(с км²), коэффициент шероховатости 0.1 (горное русло), критическая скорость потока 1.5-3.5 м/с (валуны). Это приблизительно соответствует бассейну р. Терек выше Владикавказа на Сев. Кавказе. При $k_a = 0.001$, $\Delta t^*=360$ и $\Delta x=100$ максимальное число Куранта составило 0.2, что обеспечило устойчивость схемы предиктор-корректор [7]. Масштаб времени был выбран 1 шаг по времени в модели = 35.4 * 360 суток в «натуре» и счет укладывался в $nt=100000$ шагов. Максимальная скорость тектонического поднятия для модели В. Пенка в выбранном масштабе времени равнялась Z_{max}/nt . Максимально возможная относительная высота террас Z принята в 250 м, перепад высот между террасами принят равным 0.5 максимальной глубины во время половодья D .

Расчет при косом поднятии по модели В. Пенка приводит к формированию равновесного продольного профиля русла реки, когда в каждой точке скорость врезания становится равной скорости поднятия. Этот процесс также контролируется критической скоростью потока, по достижении которой с увеличением уклонов начнется размыв коренного ложа русла. Трассы одновозрастных террас в основном проходят по гипотенузам прямоугольника поднятия, который достигает максимальной высоты 3000 м в конце этапа поднятия.

Расчет врезания в наклонную поверхность (гипотенузу прямоугольного треугольника с высотой 3000 м) по модели В. Дэвиса также приводит к формированию равновесного продольного профиля русла реки, когда в каждой точке скорость потока становится меньше критической. Размыв происходит в основном регрессивно, так как начальная поверхность имеет одинаковый уклон по

длине, но удельный расход максимален в нижней части профиля. Поэтому уклоны трасс одновозрастных террас существенно больше, чем уклон равновесного продольного профиля. Рисунки трасс всех потенциальных одновозрастных террас существенно различны для двух типов развития рельефа. Так как террасы сохраняются плохо, различия практически нивелируются.

Заключение

Так как в рельефе сохраняются лишь немногие фрагменты террас врезания, различия в рисунке одновозрастных террасовых поверхностей неочевидны и могут быть выявлены только при детальном датировании большого числа террас. На основании только морфологии террасового комплекса нельзя установить, по какой модели развивался рельеф [6], восходящим образом по В. Пенку или нисходящим по В. Дэвису.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках госбюджетной темы (ГЗ) № 121051100166-4 «Гидрология, морфодинамика и геоэкология эрозионно-русловых систем».

Литература

- [1] Дэвис В.М. Геоморфологические очерки. М.: Иностр. лит., 1962. 455 с.
- [2] Кленов В.И. О количестве речных террас // Продольный профиль рек и их террасы. М.: Моск. фил. ВГО, 1978. С. 55-59.
- [3] Сидорчук А.Ю. Эволюция рельефа речной долины в условиях тектонического поднятия: опыт морфологического анализа // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2020. № 1. С. 3-10.
- [4] Панин А.В. Сидорчук А.Ю., Чалов Р.С. Катастрофические скорости формирования флювиального рельефа // Геоморфология. 1990. № 2. С. 3-11.
- [5] Пенк В. Морфологический анализ. М.: Географгиз. 1961. 360 с.
- [6] Пейре Р., Тейлор Т.Д. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 352 с.
- [7] Exner F.M. Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen // Sitzungsberichte Acad. Wissenschaften. 1925. Sec. 2A. S. 165-180.

S u m m a r y. A simulation of the change in time of the longitudinal profile of a river during an incision in a hypothetical mountainous country was carried out for the upward development of the relief according to W. Penk and the downward development according to W. M. Davis. The formation of incision terraces and the decrease in their number over time according to an exponential law are taken into account. The differences in the morphology of a river valley with different types of river incision and the difficulties in establishing these differences in natural river valleys are shown.