

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. А. И. ГЕРЦЕНА

HERZEN STATE PEDAGOGICAL UNIVERSITY OF RUSSIA

**LXXVIII Герценовские чтения**  
**География:**  
**развитие науки и образования**

Материалы Международной научно-практической конференции  
23–26 апреля 2025 года

LXXVIII Herzen readings  
Geography:  
Development of Science and Education

Materials of the International Scientific and Practical Conference  
on April 23–26, 2025

Санкт-Петербург  
Издательство РГПУ им. А. И. Герцена  
2025

УДК 911.5

Рецензенты:

*Ал. А. Григорьев*, доктор географических наук, профессор, РГПУ им. А. И. Герцена;  
*Д. В. Севастьянов*, доктор географических наук, профессор, ЛГУ им. А. С. Пушкина

Редакционная коллегия:

*Д. А. Субетто* (отв. ред.), *А. Н. Паранина* (отв. ред.), *А. С. Баранов*, *Ю. Л. Войтеховский*,  
*Д. А. Гдалин*, *Ю. Н. Гладкий*, *В. Д. Сухоруков*, *И. М. Греков*, *Е. Д. Краснова*, *С. В. Ильинский*,  
*В. Ф. Куликов*, *С. И. Махов*, *А. В. Науменко*, *Л. А. Пестрякова*, *Н. В. Соколова*, *В. В. Брылкин*

**LXXVIII Герценовские чтения. География: развитие науки и образования :**  
**Материалы Международной научно-практической конференции 23–26 апреля**  
**2025 года / отв. ред. Д. А. Субетто, А. Н. Паранина. — Санкт-Петербург :**  
**Издательство РГПУ им. А. И. Герцена, 2025. — 1 электронно-оптический**  
**диск. — Текст : электронный.**

**LXXVIII Gertsenovsky readings. Geography: development of science and education.**  
Materials of the International Scientific and Practical Conference on April 23–26, 2025 / by ed.  
D. A. Subetto, A. N. Paranina. — St. Petersburg : Publishing house of Herzen State Pedagogical  
University of Russia, 2025. — 1 optical disk. — Text : electronic.

ISBN 978-5-8064-3705-2

Сборник материалов «География: развитие науки и образования» отражает результаты работы научно-практической конференции 78 Герценовские чтения 23–26 апреля 2025 года. Материалы сгруппированы в главы: 1. География — основа моделирования мира, 2. Современные вопросы физической географии, 3. Исследования полярных областей, 4. Лимнология и меромиктические озера, 5. Палеолимнологические и палеогеографические исследования, 6. История наук о Земле, 7. Математические методы исследований в географии, геологии и геоэкологии, 8. Геоэкология и охрана окружающей среды, 9. Развитие географического образования, 10. Социально-экономические системы и географические аспекты глобализации, 11. Регионоведение, краеведение, туризм.

УДК 911.5

Минимальные системные требования:

Тип компьютера, процессор, частота: IBM/PC; Intel Core J3 3,3 ГГц

Оперативная память (RAM): 512 Мб

Необходимо на винчестере: 65 Мб

Дополнительные программные средства: Adobe Acrobat Reader

ISBN 978-5-8064-3705-2

© РГПУ им. А. И. Герцена, 2025

© Авторы статей, 2025

# РАЗВИТИЕ ЭРОЗИОННОГО ЛАНДШАФТА ПО СЦЕНАРИЮ КОМБИНИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ПЕНКА-ДЭВИСА

А.Ю. Сидорчук

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

## EROSION LANDSCAPE EVOLUTION FOLLOWING THE SCENARIO OF THE COMBINED PENCK-DAVIS MODEL

A.Yu. Sidorchuk

*Lomonosov Moscow State University, Moscow*

Аннотация. Проведено математическое моделирование последовательного изменения во времени эрозионного ландшафта в горной стране на первом этапе по модели восходящего развития рельефа по Пенку и на втором этапе по модели нисходящего развития рельефа по Дэвису. Комбинированная модель дает обоснование представлениям Дэвиса о механизме формирования пенепплена.

*Ключевые слова: уравнение деформации, восходящее и нисходящее развитие рельефа, пенепплен.*

### Введение

В работе [1] с помощью математического моделирования проведен анализ двух известных геоморфологических моделей при действии эндогенных и экзогенных процессов. В упрощенном виде (в первую очередь для дидактических целей) модель Дэвиса [2] описывает расчленение и понижение рельефа экзогенными процессами в состоянии тектонического покоя. Модель Пенка описывает одновременное действие тектонического поднятия и эрозионно-денудационного изменения рельефа. В отдельности эти модели не дают полного представления об эволюции эрозионного ландшафта. Однако, модель Дэвиса в полном виде, без упрощений, включает в себя два этапа развития эрозионного ландшафта – этап тектонического поднятия (который Дэвис обычно не анализировал) и этап тектонической стабилизации с эрозионным расчленением территории, понижением рельефа и формированием пенепплена [2]. Цель сообщения – реализация полной модели Дэвиса, которая включает в себя модель Пенка, и которую поэтому можно назвать комбинированной моделью Пенка-Дэвиса.

### Метод

Будем анализировать изменения во времени  $t$  и пространстве  $x$  отметок  $Z$  дна речного русла при врезании реки в коренные породы. В этом случае скорость снижения отметок дна пропорциональна уклону русла  $-\frac{\partial z}{\partial x}$  и удельному расходу паводков  $q$  м<sup>2</sup>/с с учетом коэффициента абразии  $k_a$  (с размерностью 1/м):

$$\frac{\partial z}{\partial t} = H k_a q \frac{\partial z}{\partial x} + V_t \quad (1)$$

Здесь  $H$  – переменная, равная 1 если имеются условия для размыва коренных пород и 0 в обратном случае. В уравнении (1) учитывается скорость тектонических движений  $V_t$ , которая или положительна (тектоническое поднятие территории), или равна нулю (тектоническая стабильность).

Условия для размыва коренных пород ( $H=1$ ) следующие: во-первых, когда коренное дно русла не покрыто слоем аллювия, и во-вторых, когда скорость потока  $U$  больше неразмывающей  $U_{cr}$ . Первое условие находится по уравнению деформации [3], где  $q_s$  – удельный на ширину русла реки объемный расход речных наносов  $m^2/c$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = - \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (2)$$

Уменьшение расхода наносов по длине реки (в геологическом масштабе времени) означает их аккумуляцию и формирование на коренном дне слоя аллювия ( $H=0$ ), увеличение – размыв наносов и обнажение коренного дна ( $H=1$ ).

Для расчета второго условия – знака  $U-U_{cr}$ , скорость потока  $U$  оценивается по формуле Шези-Маннинга, неразмывающая скорость  $U_{cr}$  для коренных пород разного типа – по соответствующим таблицам. Применяются также эмпирические морфометрические связи удельного расхода  $q$  и глубины потока с максимальным расходом воды в половодье  $Q$ , равном произведению модуля стока  $M$  ( $m^3/(c*km^2)$ ) на площадь водосбора  $F$   $km^2$ .

## Результаты

В качестве горной страны возьмем свод в виде полу-синусоиды с четвертью длины волны  $X_{max}=90000$  м, с амплитудой 5 м на первом шаге расчета, с продолжительность эволюции эрозионного ландшафта  $T_{max}=4$  млн. лет в прошлом (примерно, с начала акчагыльского времени) + 4 млн. лет в будущем, площадь водосбора  $F_{max}=1490$ , коэффициент шероховатости в формуле Шези-Маннинга =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. Масштаб времени был выбран 1 шаг по времени в модели = 10 лет в «натуре» и счет укладывался в 800000 шагов. Расчет проводился с помощью явной схемы Лакса-Вендрофа предиктор-корректор [4], устойчивость схемы обеспечивалась выбором сочетания значений  $k_a$  в формуле (1), шага по времени  $\Delta t$  и шага по длине  $\Delta x$ .

Было реализовано несколько сценариев продолжительности этапов поднятия и стабилизации, сочетания изменений скоростей тектонических движений и климатических характеристик во времени. Рассмотрим результаты расчета по следующему сценарию: на первом этапе (прошлое) продолжительностью 4 млн лет происходит сводовое поднятие территории со скоростью от 0.2 в начале до 0.7 мм/год в конце, после чего (будущее) скорость поднятия уменьшается на протяжении 3 млн. лет от 0.7 мм/год в начале до 0 в конце, и полная тектоническая стабилизация продолжается 1 млн. лет. Слой стока изменяется в

диапазоне  $0.05-0.23 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$  в соответствии с изменениями климатического сигнала, выраженного в уровне Каспийского моря по [5]. Все количественные оценки, приводимые далее, относятся только к этому сценарию.

Результаты численного моделирования хорошо иллюстрируют главные составляющие эволюции эрозионного ландшафта. Первый этап тектонического сводового поднятия (с ускорением) разделяется на две стадии. На первой стадии первого этапа тектонический подъем свода примерно до максимальной высоты 500 м не сопровождается интенсивным врезанием рек, так как скорости потоков меньше критических для начала размыва. Эта стадия продолжается от 3.65 (начало размыва в нижнем течении рек) до 3 млн. лет назад (размыв на перевалах). После увеличения уклонов и достижения скоростей потоков значений неразмывающей скорости на фоне увеличения скорости тектонического поднятия начинается интенсивное врезание рек. В целом на второй стадии 0 – 3 млн. лет назад скорости врезания увеличиваются прямо пропорционально скоростям тектонического поднятия, но в среднем меньше на 0.07 мм/год. Такое сочетание скоростей поднятия и врезания приводит к общему увеличению амплитуды эрозионного ландшафта, в вершинах главных консеквентных рек (на перевалах) высоты достигают 940 м, при максимальном тектоническом поднятии территории на 3 км. Климатические изменения приводят к соответствующим изменениям скоростей врезания, во время самых мощных пльвиалов скорость эрозии может быть больше скорости тектонического поднятия и абсолютные отметки продольных профилей рек временно уменьшаются (эпизоды 0.8 и 1.2 млн. лет назад). Формирование равновесного продольного профиля русла реки, когда в каждой точке скорость врезания становится равной скорости поднятия, на первом этапе не наблюдается.

Второй этап тектонического сводового поднятия (гипотетический, с замедлением) также разделяется на две стадии. На первой, продолжительностью 3 млн. лет, происходит замедление тектонического поднятия с 0.7 мм/год до 0. На этой стадии скорость врезания рек уменьшается прямо пропорционально скоростям тектонического поднятия, но в среднем больше на 0.06 мм/год. Такое сочетание скоростей поднятия и врезания приводит к общему уменьшению амплитуды эрозионного ландшафта, в вершинах главных консеквентных рек (на перевалах) высоты снижаются до 500 м, при максимальном общем тектоническом поднятии территории на 4.0 км (на 1.8 за второй этап). Фактически, в конце первой стадии второго этапа эрозионный (но не тектонический) ландшафт приходит в состояние, в котором он был в конце первой стадии первого этапа.

Вторая стадия второго этапа – полная тектоническая стабилизация территории, т.е. реализация модели Дэвиса в условиях развитого эрозионного рельефа. Скорость эрозии не зависит от скорости тектонических движений (за отсутствием последних), а определяется энергией рельефа и климатическими характеристиками стока воды. На первых 0.5 млн. лет этой стадии энергии рельефа достаточно, чтобы в среднем поддерживать скорость врезания рек 0.2 мм/год, от 0.1 в аридные эпохи и 0.3 в пльвиальные. Происходит формирование дэвисовского пенеплена – отметки высот продольных профилей рек понижаются

равномерно по всей длине в соответствии с уклонами и стоком воды. В конце этой стадии, когда высоты перевалов в верховьях консеквентных рек снижаются до 280 м, продольные профили рек стабилизируются. Однако, в периоды наиболее мощных пювиалов скорость эрозии может увеличиться в среднем до 0.04 мм/год, т.е. даже в этих условиях продольные профили рек не являются равновесными. Если же учесть, что с замедлением или даже прекращением механической эрозии на первый план выходят процессы химической и биологической денудации, то формирование пенеплена с понижением высот местности продолжается до начала нового этапа тектонической активности.

### **Заключение**

Комбинированная модель Пенка-Дэвиса двухэтапного изменения во времени эрозионного ландшафта воспроизводит на первом этапе восходящее развитие рельефа по Пенку и на втором этапе нисходящее по Дэвису. Эта модель дает обоснование представлениям Дэвиса о механизме формирования пенеплена.

### **Благодарности**

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

### **Литература**

- [1] Сидорчук А.Ю. Эволюция продольного профиля реки // LXXVII Герценовские чтения. География: развитие науки и образования: Материалы Международной научно-практической конференции 22-26 апреля 2024 года. Т. 2. Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена Санкт-Петербург: 2024. С. 25-28.
- [2] Дэвис В.М. Геоморфологические очерки. М.: Иностр. лит., 1962. 455 с.
- [3] Exner F.M. Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen // Sitzungsberichte Acad. Wissenschaften. 1925. Sec. 2A. S. 165-180.
- [4] Пе́йре Р., Тейлор Т.Д. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 352 с.
- [5] Зубаков В.А. Глобальные климатические события неогена. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 224 с.

S u m m a r y. Mathematical modelling of successive changes in time of erosion landscape in a mountainous country was carried out at the first stage according to the model of upward relief development according to Penk and at the second stage according to the model of downward relief development according to Davis. The combined model substantiates Davis's ideas about the mechanism of peneplain formation.