

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК 551.4.01; 551.4.04; 551.248

А.Ю. Сидорчук¹**ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ТЕРРАС В РЕЧНОЙ ДОЛИНЕ: ОПЫТ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

Вальтер Пенк сформулировал понятие морфологического анализа как метода восстановления хода и развития движений земной коры путем изучения экзогенных процессов и существующего геоморфологического строения. Для его реализации в геоморфологию был введен дифференциальный метод, который позволяет рассматривать одновременное влияние на рельеф экзогенных и эндогенных процессов. Основным дифференциальным уравнением для исследования этих процессов является уравнение деформации Ф. Экснера, записанное с учетом скоростей тектонических движений. Использование уравнения деформации позволяет установить возможности применения морфологического анализа при изучении речных долин. Так, морфологический анализ является излишним при оценке интенсивности современных тектонических движений. При наличии в речной долине датированных террас врезания с известными высотами можно оценить дифференцированно во времени скорости врезания, т. е. действие экзогенных процессов. Характеристики тектонического поднятия, т. е. действие эндогенных сил, определяются при этом косвенно. Интенсивность тектонического поднятия в геологическом прошлом определяется по высоте и возрасту начальной поверхности выравнивания, но только интегрально, как средняя скорость поднятия для всего периода врезания речного русла. Дифференцированное определение скоростей тектонического поднятия по информации о высотах и возрасте отдельных террас врезания возможно в частном случае равенства интенсивности экзогенных и эндогенных процессов в среднем за периоды между образованием сохранившихся террас.

Ключевые слова: Дифференциальный метод, уравнение деформации, террасы врезания, скорости тектонического поднятия, скорости врезания рек

Введение. Около ста лет назад Вальтер Пенк сформулировал задачу: «восстановить ход и развитие движений земной коры путем изучения экзогенных процессов и существующего геоморфологического строения» – морфологический анализ. В одноименной книге [Пенк, 1961], вышедшей в 1924 г. уже после смерти автора, В. Пенк обосновал необходимость исследования эндогенных и экзогенных процессов формирования рельефа с помощью количественного дифференциального метода. Такой подход противопоставлялся доминировавшему тогда качественному анализу процесса формирования рельефа [Дэвис, 1962]. Сам В. Пенк, фактически, не применил дифференциального метода (только в виде весьма упрощенных диаграмм), так как ко времени написания его монографии еще не были записаны дифференциальные уравнения, которые могли бы описать эволюцию рельефа под воздействием экзогенных и эндогенных процессов. Первое такое уравнение – уравнение деформации – появилось в 1925 году в работе Ф. Экснера [Exner, 1925]. Оно описывало движение гряд на дне речного русла, но было основано на фундаментальном законе сохранения вещества, и поэтому в дальнейшем его модификации получили применение при решении самых разных задач геоморфологии [Девдариани, 1967а].

Без преувеличения, уравнение деформации Ф. Экснера можно назвать основным уравнением геоморфологии. Однако для решения задач морфологического анализа уравнение деформации Экснера практически не применялось, и поэтому возможности морфологического анализа как метода исследования тектонических движений слабо изучены на количественном уровне. В предлагаемой статье на примере количественного исследования эволюции рельефа речной долины проводится оценка степени применимости морфологического анализа для восстановления хода и развития тектонических движений.

Методы исследования. *Уравнение деформации продольного профиля реки при наличии тектонических движений.* Исходя из баланса наносов, изменение отметки поверхности z во времени t соответствует изменению удельного (на ширину потока наносов) объемного расхода вещества q_s по длине x при наличии бокового притока наносов q_b , что и описывает уравнение деформации

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{\partial q_s}{\partial x} + q_b. \quad (1)$$

В дальнейшем мы будем анализировать изменения отметок дна речного русла. Тогда q_s есть

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, докт. геогр. н., вед. науч. с.; e-mail: fluvial05@gmail.com

удельный на ширину русла расход руслообразующих наносов, z – средняя по ширине реки W отметка дна речного русла, q_b – приток наносов со склонов на участок русла шириной W и длиной dx . Уменьшение расхода наносов по длине реки означает аккумуляцию наносов и повышение отметок речного дна, увеличение расхода – эрозию и понижение отметок дна. Нулевой баланс расхода наносов означает стабильность речного дна. При наличии тектонических движений со скоростью V уравнение (1) приобретает вид

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

Уравнение (2) записано в самом общем виде. При соответствующей расшифровке входящих в него членов оно годится для описания самых разных процессов, например, склоновых [Трофимов, Московкин, 1983; Бронгулеев, 2018]. Это уравнение является реализацией дифференциального метода и полностью соответствует целям морфологического анализа, так как включает в себя все необходимые компоненты: изменение рельефа (левая часть уравнения) под влиянием экзогенных (первый и второй члены в правой части) и эндогенных процессов (третий член в правой части). На примере решения уравнений (1) и (2) для рельефа речной долины и формирования комплекса террас проводится оценка степени применимости морфологического анализа для восстановления хода и развития тектонических движений. При этом предполагается, что средняя за длительный период времени скорость тектонических движений положительна (тектоническое поднятие), а в величине скорости врезания $V_{\text{врез}} = \frac{\partial q_s}{\partial x} - q_b$ доминирует компонент $\frac{\partial q_s}{\partial x}$.

Результаты и обсуждение. Оценка скорости современных тектонических движений. Для определения скорости современных тектонических движений V с помощью уравнения (2) необходимо знать современную скорость изменений отметок продольного профиля дна реки и изменение расхода наносов по ее длине с учетом их поступления со склонов. Расход наносов может быть измерен или рассчитан. Изменение средних по ширине русла отметок дна необходимо получить относительно неподвижных реперов с неизменными абсолютными отметками. В тектонически активных областях существование таких реперов проблематично, поэтому уравнение (2) записывается как

$$\frac{\partial z_{\text{отн}}}{\partial t} = \left(\frac{\partial z_{\text{абс}}}{\partial t} - V \right) = -V_{\text{врез}}, \quad (3)$$

где $z_{\text{отн}}$ – это отметки дна речного русла относительно подвижных реперов, абсолютные отметки которых изменяются за счет тектонических движений так же, как и отметки дна русла. В общем случае получить скорости тектонических движений с помощью уравнения (3) невозможно. Для опреде-

ления изменения абсолютных отметок дна русла $z_{\text{абс}}$ требуется введение поправок в отметки подвижных реперов путем привязки к внешним неподвижным реперам с известными абсолютными отметками, что равносильно измерению скорости современных тектонических движений [Лиленберг, 1980].

Единственный вариант, когда можно оценить скорости тектонических движений по уравнению (3) без поправок, внесенных в отметки реперов, – это случай равенства скоростей врезания русла и скоростей современных тектонических движений:

$$V = V_{\text{врез}}. \quad (4)$$

Однако геоморфологических критериев для диагностики такого варианта не существует. В случае близости базиса эрозии возможно равенство нулю

величины $\frac{\partial z_{\text{абс}}}{\partial t}$, но в таком случае весьма вероятно, что $V_{\text{врез}} \gg V$. Тогда равенство (4) превращается в неравенство, которое уже невозможно использовать для оценки скорости современных тектонических движений.

Таким образом, можно заключить, что применение дифференциального подхода в виде уравнения (2) является избыточным, а морфологический анализ В. Пенка неприменим для оценки скоростей современных тектонических движений.

Исследование лестницы террас врезания для оценки скорости тектонических движений в геологическом прошлом. Рассмотрим случай врезания реки и формирования лестницы террас врезания (или врезывания по С.С. Шульцу [1940]). Этот процесс может происходить как при отсутствии тектонических движений (модель Дэвиса), так и при их наличии (модель Пенка).

Уравнение (1) описывает изменения во времени средних отметок продольного профиля как функцию изменения по длине реки удельного расхода наносов (модель Дэвиса), а уравнение (2) учитывает и скорость тектонического поднятия (модель Пенка). Для каждого значения продольной координаты x эти отметки непрерывны во времени t . Процесс формирования террас врезания делает этот непрерывный ряд дискретным, так как пойма выходит из-под уровня затопления дискретно и во времени, и в пространстве, а размыв фрагментов террас при блуждании русла увеличивает степень этой дискретности [Кленов, 1978]. В результате на бортах речной долины сохраняются фрагменты террас врезания разного возраста, лежащие на разных абсолютных и относительных высотах. Тем не менее, на отдельных участках речной долины бывает достаточно датированных фрагментов террас [Berg, Hoof, 2001], чтобы восстановить исходный непрерывный ряд отметок продольного профиля.

В модели Пенка эволюция рельефа начинается с исходной низкой поверхности. Рассмотрим точку с продольной координатой x с отметкой z_{t_0} , которая начинает деформироваться с момента времени $t_0=0$ (или T лет назад, T – общее время поднятия).

К моменту времени t_1 эта поверхность была поднята тектоническими движениями за время $t_1 - t_0$ на

величину $\int_{t_0}^{t_1} V dt$; при этом русло врезалось на

величину $\int_{t_0}^{t_1} V_{впз} dt$. Связь отметок поверхности сохранившихся фрагментов наиболее древней террасы врезания (№ 1), которая сформировалась в момент времени t_1 , величин врезания русла и тектонического поднятия описывает формула (5):

$$z_{тер1}(t_1) = z_{t_0}(t_0) + h_{t_1} + \int_{t_0}^{t_1} V dt - \int_{t_0}^{t_1} V_{впз} dt, \quad (5)$$

где h_{t_1} – высота поймы в момент выхода из-под уровня затопления. В момент времени t_2 начальная поверхность была поднята тектоническими движениями на величину $\int_{t_1}^{t_2} V dt$. Терраса № 1 была поднята

на величину $\int_{t_1}^{t_2} V dt$ и заняла отметку

$z_{тер1}(t_2) = z_{тер1}(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} V dt$. Однако положение рассматриваемого фрагмента террасы № 1 уже изменилось, и его старая отметка $z_{тер1}(t_1)$ на местности никак не зафиксирована, ее необходимо вычислить по формуле (5). Тогда

$$z_{тер1}(t_2) = z_{t_0}(t_0) + h_{t_1} + \int_{t_0}^{t_2} V dt - \int_{t_0}^{t_1} V_{впз} dt. \quad (6)$$

К моменту времени T (настоящее время) поверхность этой террасы будет поднята до отметки

$$z_{тер1}(T) = z_{t_0}(t_0) + h_{t_1} + \int_{t_0}^T V dt - \int_{t_0}^{t_1} V_{впз} dt. \quad (7)$$

Таким образом, современная высотная отметка террасы № 1, которая образовалась в момент времени t_1 , складывается из высоты начального продольного профиля (начальной поверхности выравнивания), высоты поймы в момент выхода из-под уровня затопления, полной высоты тектонического поднятия и глубины эрозионного вреза за период $t_1 - t_0$.

Современные отметки поверхности сохранившихся фрагментов террасы врезания № 2, которая сформировалась в момент времени t_2 , определяются с применением тех же выкладок:

$$z_{тер2}(T) = z_{t_0}(t_0) + h_{t_2} - \int_{t_0}^{t_2} V_{впз} dt + \int_{t_0}^T V dt. \quad (8)$$

Аналогичные связи записываются и для всех прочих террас врезания:

$$z_{терN}(T) = z_{t_0}(t_0) + h_{t_N} - \int_{t_0}^{t_N} V_{впз} dt + \int_{t_0}^T V dt. \quad (9)$$

Сравнение формул типа (6) - (9) показывает, что относительная высота террасы времени образования $t_{(N-1)}$ над террасой времени образования t_N

$$z_{тер(N-1)} - z_{терN} = h_{t(N-1)} - h_{t_N} + \int_{t(N-1)}^{t_N} V_{впз} dt \quad (10)$$

не зависит ни от формы начального профиля, ни от скорости тектонических движений, а определяется средней скоростью врезания русла в период $t_N - t_{(N-1)}$.

Нетрудно видеть, что относительные высоты террас врезания в модели Дэвиса тоже описываются формулой (10). Более того, «абсолютные» высоты террас по модели Дэвиса равны «абсолютным» высотам террас по модели Пенка (формула (9)) при совпадении начальной поверхности в модели Дэвиса и конечной поверхности в модели Пенка

$z_{t_0}(\text{Дэвис}) = z_{t_0}(\text{Пенк}) + \int_{t_0}^T V dt$ (и то, и другое – поднятая поверхность выравнивания), и одинаковой

средней скорости врезания $\int_{t_0}^T V_{впз} dt$. Таким образом,

без дополнительных критериев эволюции речной долины, только на основании морфологии лестницы террас, отличить модель Дэвиса (нисходящее развитие рельефа) от модели Пенка (восходящее развитие рельефа) весьма затруднительно.

Формула (9) для «абсолютных» высот террас врезания показывает, что задача, поставленная В. Пенком (морфологический анализ), по данным о высотах речных террас врезания решается только интегрально. Даже если есть уверенность в том, что происходило именно восходящее развитие рельефа, и речные террасы формировались в ходе тектонического поднятия, можно дать оценку только средней скорости V_m за все время этого поднятия

$$\int_{t_0}^T V dt = z_{терN}(T) - z_{t_0}(t_0) - h_{t_N} + \int_{t_0}^{t_N} V_{впз} dt. \quad (11)$$

Поскольку

$$\int_{t_0}^{t_N} V_{впз} dt = z_{t_0}(T) - z_{терN}(T) + h_{t_N} \quad (12)$$

то

$$V_m = \frac{1}{T} \int_{t_0}^T V dt = \frac{z_{t_0}(T) - z_{t_0}(t_0)}{T}. \quad (13)$$

В формуле (13) $z_{t_0}(t_0)$ – это высота начальной поверхности, а $z_{t_0}(T)$ – ее конечная высота через время $t=T$. Формула (13) соответствует хорошо известному методу определения скоростей новейших тектонических движений по возрасту и высотам поверхностей выравнивания [Николаев, 1962; Милановский, 1968].

Связь скорости врезания рек со скоростью тектонических движений. Существует ли прямая связь между скоростью врезания рек и скоростью тектонических движений? В случае положительного ответа, по относительным высотам террас врезания, которые определяются скоростями врезания рек (формула 10), можно было бы дифференцировать скорости тектонических движений. Средняя скорость врезания V_B за период времени $t_N - t_{(N-1)}$ есть функция изменения удельного расхода наносов по длине реки с учетом их поступления со склонов

$$V_B = \frac{1}{t_N - t_{(N-1)}} \int_{t_{(N-1)}}^{t_N} V_{\text{врс}} dt. \quad (14)$$

Различаются два типа расхода наносов. Первый тип – это движение рыхлого материала по дну реки в виде руслообразующих наносов. Эти наносы в основном поступают на днище речной долины со склонов или из притоков, и их перенос контролируется транспортирующей способностью потока и абразией частиц наносов. Сюда же относится формирование наносов в днище речной долины за счет размыва рыхлых коренных или древних аллювиальных отложений. Второй тип – это формирование наносов в днище речной долины за счет размыва (абразии) скальных (связных) коренных пород. Такой размыв может осуществляться только в условиях локального или общего дефицита руслообразующих наносов, когда отдельные участки коренного днища речной долины обнажаются и могут быть размыты (абрадированы).

Для описания первого типа расхода наносов имеется большое количество эмпирических и полуэмпирических формул. Будем использовать хорошо зарекомендовавшую себя формулу К.В. Гришанина [1972]:

$$q_s = k \left(\frac{U}{U_{cr}} \right)^2 (U - U_{cr}) D, \quad (15)$$

где U – скорость течения, U_{cr} – критическая скорость начала размыва частиц диаметром D . При исследовании изменений рельефа целесообразно записать куб скорости потока с помощью формулы Шези через уклон свободной поверхности потока S , глубину d и удельный расход воды q :

$$U^3 = UC^2 S d = C^2 q S, \quad (16)$$

где C – коэффициент в формуле Шези. При осреднении по длине систем плес-перекат уклон свободной поверхности будет равен отрицательному градиенту осредненных отметок дна по длине русла

$$S = - \frac{\partial z}{\partial x}. \quad (17)$$

Тогда уравнение (14) для средней скорости врезания реки запишется в виде

$$V_B = - \frac{1}{t_N - t_{(N-1)}} \int_{t_{(N-1)}}^{t_N} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(a_{cr} \frac{\partial z}{\partial x} \right) + q_b \right] dt. \quad (18)$$

Переменная по длине реки величина a_{cr} включает характеристики потока и состава наносов:

$$a_{cr} = k \frac{(U - U_{cr})}{U_{cr}^3} C^2 q D. \quad (19)$$

Как видно из (18) и (19), прямой зависимости между скоростью врезания и скоростью тектонических движений нет. Тектонические условия влияют на состав руслообразующих наносов и на уклон реки, но только опосредованно. Кроме того, в формулу (18) входит не собственно уклон реки, а его изменение по длине, то есть кривизна продольного профиля. В случае выпуклого профиля происходит врезание реки, а в случае вогнутого – аккумуляция наносов. Очевидно, что форма продольного профиля реки не зависит от скорости тектонических движений. Например, при пересечении рекой воздымающихся хребтов в antecedentной долине выше по течению оси хребта продольный профиль реки вогнутый, и в условиях тектонического поднятия происходит аккумуляция наносов в области подпора. Ниже по течению от оси хребта при тех же скоростях тектонического поднятия продольный профиль реки выпуклый, и идет врезание русла [Матвеев с соавт., 1992].

Второй тип расхода наносов исследован хуже. Если исходить из того, что он формируется путем абразии коренных пород влекомыми наносами, скорость снижения отметок дна будет пропорциональна расходу таких наносов с учетом коэффициента абразии k_a :

$$V_B = - \frac{1}{t_N - t_{(N-1)}} \int_{t_{(N-1)}}^{t_N} \left[\left(k_a a_{cr} \frac{\partial z}{\partial x} \right) + q_b \right] dt. \quad (20)$$

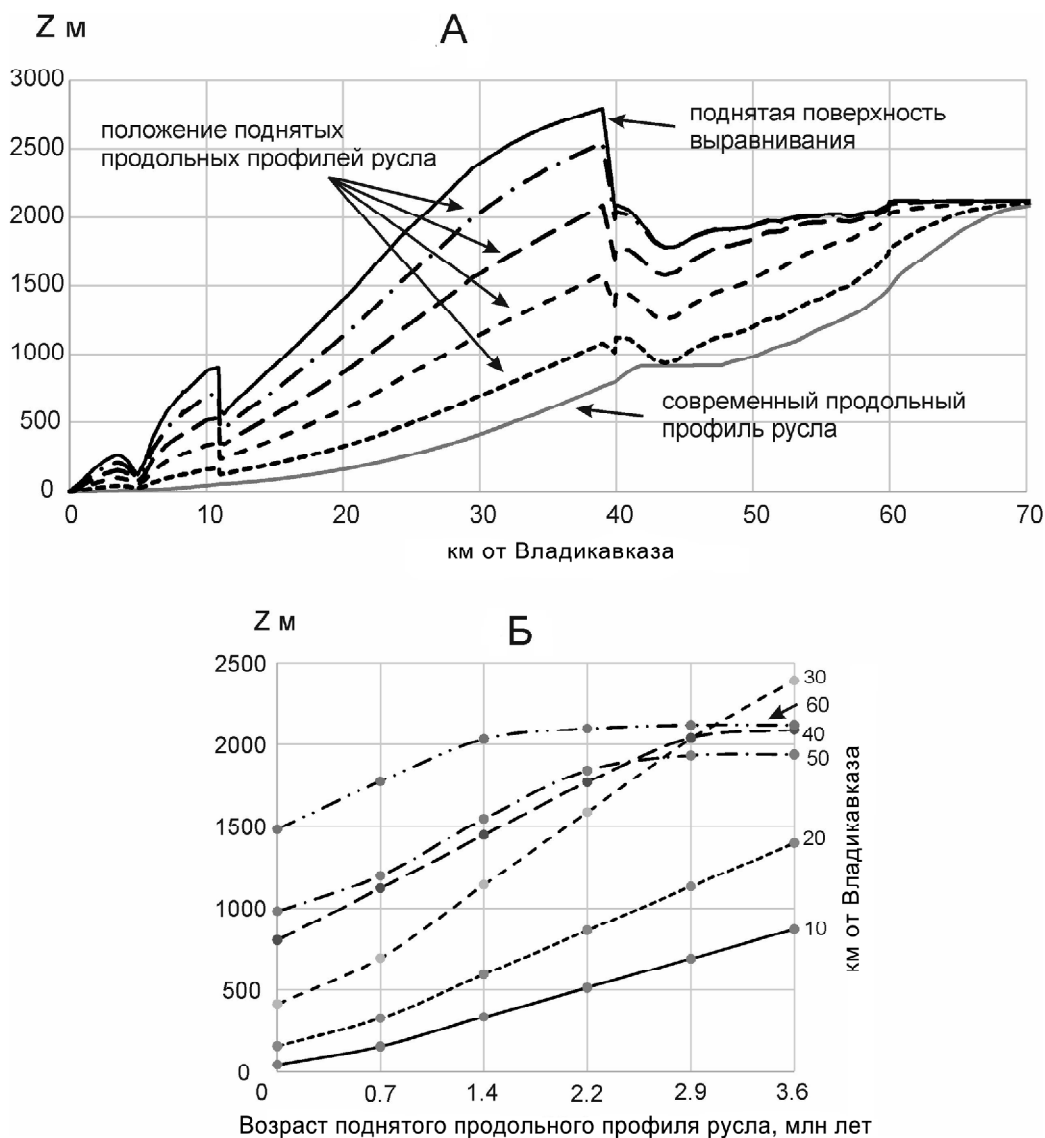
Формула такого вида была получена при рассмотрении эрозии связных грунтов. Как отмечалось, такой тип формирования расхода наносов реализуется в условиях дефицита наносов во время мощных паводков, когда в плесах обнажаются и размываются коренные породы. Такой размыв достаточно часто происходит в горных реках, но наблюдается и в равнинных реках, и даже в рукавах речных дельт [Нижняя Волга, 2002].

Величина поступления наносов со склонов на единицу площади русла q_b определяется характером склоновых процессов, для которых важны форма склона, его средний уклон, мощность и состав отложений, условия увлажненности и пр. Скорость тектонических движений и здесь может проявляться только косвенно.

Пример расчета эволюции продольного профиля реки. Для иллюстрации вышесказанного прове-

дены упрощенные расчеты изменения продольного профиля реки во времени при одновременном действии экзогенных и эндогенных процессов. Основой явился рис. 28 из книги Е.Е. Милановского [1968], на котором показана поднятая верхнеплиоценовая поверхность выравнивания на участке долины р. Терек от Владикавказа до Крестовского перевала. По высотам этой поверхности Z (условно принят ее возраст 3,6 млн лет) заданы скорости тектонических движений, для простоты неизменные во времени, и проведен расчет по формуле (2). Изменение расхода наносов по длине реки вычислялось по формуле (20). Величина a_{gr} принималась пропорциональной площади водосбора. Коэффициент k_a , также для простоты расчетов неизменный во времени, калибровался таким образом, чтобы рассчитанный конечный про-

дольный профиль реки соответствовал современному натурному. Для нескольких временных срезов рассчитаны положения поднятых продольных профилей реки (рис. 1А). Построенные зависимости между возрастом поднятого продольного профиля (террасы) и абсолютными отметками поверхности Z (рис. 1Б) для разных участков речной долины (вариант графиков Кригера [1963]) характеризуются явно выраженной нелинейностью. Хотя приведенный расчет выполнен при предельном упрощении реальной гораздо более сложной картины, нелинейность таких связей при неизменной во времени скорости тектонического поднятия и климатических характеристик указывает на невозможность определения дифференцированных скоростей тектонического поднятия по морфологии террас врезания.



Результаты упрощенных расчетов изменения продольного профиля реки во времени при одновременном действии экзогенных и эндогенных процессов. Пояснения см. в тексте

Results of simplified calculation of the temporal changes of river longitudinal profile under simultaneous action of exogenous and endogenous processes. See comments in the text

Случай равенства интенсивности врезания рек и интенсивности тектонического поднятия. Единственный вариант, когда можно оценить скорости тектонических движений по высотам террас врезания, это случай неизменных во времени абсолютных отметок дна русла $z_0(t)$. Тогда средние скорости врезания русла равны средним скоростям тектонического поднятия за тот же интервал времени. Актуальная скорость врезания может быть и больше актуальной скорости тектонического поднятия, но в среднем они будут равны, так как по достижении отметки $z_0(t)$ врезание по определению прекращается.

Если в уравнении (10) вместо величины вреза-

ния $\int_{t(N-1)}^{tN} V_{вр} dt$ за время $t_N - t_{N-1}$ подставить величину

тектонического поднятия $\int_{t(N-1)}^{tN} V dt$ за тот же период

времени, то получим среднюю скорость тектонического поднятия по относительным высотам террас врезания:

$$\int_{t(N-1)}^{tN} V dt = z_{тер(N-1)} - z_{терN} - h_{t(N-1)} + h_{tN}. \quad (21)$$

Аналогичное изменение формулы (11) дает среднюю скорость тектонического поднятия на основании абсолютной высоты N -ной террасы:

$$\int_{tN}^T V dt = z_{терN}(T) - z_{t0}(t0) - h_{tN}. \quad (22)$$

В природе вариант практически неизменного во времени положения продольного профиля русла в основном реализуется в antecedentных долинах в низовьях крупных рек. Например, это р. Лена в пределах «Ленской трубы» при пересечении Верхоянского хребта, р. Яна при пересечении Куларского хребта. В обоих случаях базисом эрозии служит уровень Северного Ледовитого океана, между берегом которого и выходом из antecedentных долин расположены плоские дельтовые и шельфовые равнины. Резонно предположить, что продольные профили обеих рек в осевых частях названных хребтов оставались все это время на близких отметках. На каждом из этих участков мощный поток пропиливает долину в сравнительно легко размываемых по-

родах флишевого комплекса, так что условие неизменности отметок начального продольного профиля выполняется для всего периода развития этих участков долин. Обе реки характеризуются паводковым режимом стока восточносибирского типа; размыв коренных пород в плесах происходит достаточно часто. В этих условиях морфологический анализ дает не только средние скорости за все время тектонического поднятия, но и позволяет оценить их дифференцированно для всех террас врезания (при известном времени их образования). Именно этот случай рассматривали Н.И. Маккавеев [1971] и, для более общей задачи, А.С. Девдариани (1967б).

Выводы:

– дифференциальный метод, введенный в геоморфологию В. Пенком, является мощным средством исследования процессов формирования рельефа земной поверхности. В частности, он позволяет установить возможности применения морфологического анализа (т. е. восстановления истории тектонических движений путем исследования современного рельефа местности) при изучении речных долин;

– морфологический анализ является излишним при оценке интенсивности современных тектонических движений, поскольку для его реализации необходимо провести эту оценку независимыми методами;

– при наличии в речной долине датированных террас врезания с известными высотами можно оценить скорости врезания, т. е. действие экзогенных процессов, дифференцированно во времени. Характеристики тектонического поднятия, т. е. действие эндогенных процессов, определяются при этом только косвенно;

– скорость тектонического поднятия в геологическом прошлом определяется по высоте и возрасту начальной поверхности выравнивания, но только в среднем для всего периода врезания и при условии, что достоверно известно о происходившем именно восходящем развитии рельефа;

– дифференцированное определение скоростей тектонического поднятия по информации о высотах и возрасте террас врезания возможно в частном случае равенства интенсивности проявления экзогенных и эндогенных процессов в среднем за периоды между образованием сохранившихся террас. Такие условия могут складываться в низовьях крупных рек, пересекающих локальные поднятия в antecedentных долинах.

Благодарности. Работа выполнена по теме «Эволюция и трансформация эрозионно-русловых систем в условиях изменения природной среды и антропогенных нагрузок (ГЗ)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бронгулеев В.В.* Математические методы в геоморфологии. М.: Медиа-Пресс, 2018. 127 с.
- Гришанин К.В.* Теория руслового процесса. М.: Транспорт, 1972. 216 с.
- Девдариани А.С.* Математический анализ в геоморфологии. М.: Недра, 1967а. 156 с.
- Девдариани А.С.* К вопросу о компенсации тектонических движений сносом и осадконакоплением в образовании равнин: Рельеф Земли и математика. М.: Мысль, 1967б. С. 108–115.
- Дэвис В.М.* Геоморфологические очерки / Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 455 с.
- Кленов В.И.* О количестве речных террас // Продольный профиль рек и их террасы / Отв. ред. Л.В. Борисевич. М.: Моск. фил. ВГО, 1978. С. 55–59.
- Кригер Н.И.* Террасовые ряды: Некоторые итоги исследований: Количественные методы в геоморфологии. М.: Географгиз, 1963. С. 20–33.
- Лилиенберг Д.А.* Общие и региональные закономерности современной геодинамики Кавказа (по геоморфологическим и инструментальным данным). Сборник СДЗК. Киев: Наукова думка, 1980. С. 204–217.
- Маккавеев Н.И.* Сток и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. 116 с.
- Матвеев Б.В., Панин А.В., Сидорчук А.Ю.* Развитие антецедентной долины р. Яны на участке пересечения Куларского хребта // География и природные ресурсы. 1992. № 1. С. 102–107.
- Милановский Е.Е.* Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.
- Нижняя Волга: геоморфология, палеогеография и русловая морфодинамика / Под ред. Г.И. Рычагова и В.Н. Коротаева. М.: ГЕОС, 2002. 242 с.
- Николаев Н.И.* Неотектоника и ее выражение в структуре и рельефе территории СССР. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 392 с.
- Пенк В.* Морфологический анализ / Пер. с нем. М.: Географгиз, 1961. 360 с.
- Трофимов А.М., Московкин В.М.* Математическое моделирование в геоморфологии склонов. Казань: изд-во Казанск. ун-та, 1983. 218 с.
- Шульц С.С.* Опыт генетической классификации речных террас // Известия Всесоюзн. геогр. об-ва. 1940. Т. 92. № 6. С. 739–749.
- Exner F.M.* Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen // Sitzungsberichte der Academie der Wissenschaften. 1925. Sec. 2A. P. 165–180.
- van den Berg M.W. & van Hoof T.* The Maas terrace sequence at Maastricht, SE Netherlands: evidence for 200 m of late Neogene and Quaternary surface uplift // River Basin Sediment Systems: Archives of Environmental Change. A.A. BALKEMA PUBLISHERS. 2001. P. 45–86.

Поступила в редакцию 28.08.2018
После доработки 15.05.2019

A.Yu. Sidorchuk¹

**FORMATION OF TERRACE COMPLEX IN A RIVER VALLEY:
AN ATTEMPT OF MORPHOLOGICAL ANALYSIS**

Walther Penck formulated the concept of morphological analysis as a procedure of deducing the course and development of crustal movements from the exogenous processes and the morphological features. To implement it a differential method was introduced into geomorphology. It allows considering the simultaneous action of both exogenous and endogenous processes on relief formation. The basic differential equation for the investigation of these processes is the Exner's equation of deformation, written with an additional term to account for the tectonic movements. The use of the equation of deformation makes it possible to determine the potential of the morphological analysis for the investigation of river valleys. Thus, the morphological analysis seems unnecessary in assessing the intensity of modern tectonic movements. The rates of river incision, i.e. the effect of exogenous processes, could be differentiated over time if there are dated terraces of incision with known heights in a river valley. In this case the characteristics of tectonic uplift, i.e. the action of endogenous forces, could be judged indirectly. The intensity of tectonic uplift in the geological past is determined by the height and age of the initial surface, but only integrally, in terms of the average rate of uplift for the entire period of river bed incision. A differentiated estimation of tectonic uplift rates from the information on altitudes and age of individual terraces of incision is only possible for the periods between the formation of now-existing terraces in case of the equal intensity of exogenous and endogenous processes.

Key words: differential method, equation of deformation, terraces of incision, tectonic uplift rates, river incision rates

Acknowledgements. The study was implemented under the State Research Task «Evolution and transformation of erosion-channel systems under the changing environment and the anthropogenic pressure».

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: fluvial05@gmail.com

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бронгулеев В.В.* Математические методы в геоморфологии. М.: Медиа-Пресс, 2018. 127 с.
- Гришанин К.В.* Теория руслового процесса. М.: Транспорт, 1972. 216 с.
- Девдариани А.С.* Математический анализ в геоморфологии. М.: Недра, 1967а. 156 с.
- Девдариани А.С.* К вопросу о компенсации тектонических движений сносом и осадконакоплением в образовании равнин: Рельеф Земли и математика. М.: Мысль, 1967б. С. 108–115.
- Дэвис В.М.* Геоморфологические очерки / Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 455 с.
- Кленов В.И.* О количестве речных террас // Продольный профиль рек и их террасы / Отв. ред. Л.В. Борисевич. М.: Моск. фил. ВГО, 1978. С. 55–59.
- Кригер Н.И.* Террасовые ряды: Некоторые итоги исследований: Количественные методы в геоморфологии. М.: Географиз, 1963. С. 20–33.
- Лилиенберг Д.А.* Общие и региональные закономерности современной геодинамики Кавказа (по геоморфологическим и инструментальным данным). Сборник СДЗК. Киев: Наукова думка, 1980. С. 204–217.
- Маккавеев Н.И.* Сток и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. 116 с.
- Матвеев Б.В., Панин А.В., Сидорчук А.Ю.* Развитие антецедентной долины р. Яны на участке пересечения Куларского хребта // География и природные ресурсы. 1992. № 1. С. 102–107.
- Милановский Е.Е.* Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.
- Нижняя Волга: геоморфология, палеогеография и русловая морфодинамика / Под ред. Г.И. Рычагова и В.Н. Коротаева. М.: GEOS, 2002. 242 с.
- Николаев Н.И.* Неотектоника и ее выражение в структуре и рельефе территории СССР. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 392 с.
- Пенк В.* Морфологический анализ / Пер. с нем. М.: Географиз, 1961. 360 с.
- Трофимов А.М., Московкин В.М.* Математическое моделирование в геоморфологии склонов. Казань: изд-во Казанск. ун-та, 1983. 218 с.
- Шульц С.С.* Опыт генетической классификации речных террас // Известия Всесоюз. геогр. об-ва. 1940. Т. 92. № 6. С. 739–749.
- Exner F.M.* Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen // Sitzungsberichte der Academie der Wissenschaften. 1925. Sec. 2A. P. 165–180.
- van den Berg M.W. & van Hoof Ton* The Maas terrace sequence at Maastricht, SE Netherlands: evidence for 200 m of late Neogene and Quaternary surface uplift // River Basin Sediment Systems: Archives of Environmental Change. A.A. BALKEMA PUBLISHERS. 2001. P. 45–86.

Поступила в редакцию 28.08.2018

После доработки 15.05.2019

REFERENCES

- Bronguleev V.V.* Matematicheskiye metody v geomorfologii [Mathematical methods in geomorphology]. M.: Media-Press, 2018. 127 p. (In Russian)
- Davis W.M.* Geomorphological essays. Moscow: Izd-vo inostr. lit., 1962. 455 p. (In Russian)
- Devdariani A.C.* K voprosu o kompensatsii tektonicheskikh dvizheniy snosom i osadkonakopleniyem v obrazovanii ravnin [On the problem of compensation of tectonic movements by erosion and sedimentation in the formation of plains]: Relief of the Earth and mathematics. M.: Mysl', 1967. P. 108–115. (In Russian)
- Devdariani A.C.* Matematicheskiy analiz v geomorfologii [Mathematical analysis in geomorphology]. M.: Nedra, 1967. 156 p. (In Russian)
- Exner F.M.* Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen // Sitzungsberichte der Academie der Wissenschaften. 1925. Sec. 2A. P. 165–180.
- Grishanin K.V.* Teoriya ruslovogo protsessa. [Theory of the channel process]. Moscow: Transport, 1972. 216 p. (In Russian)
- Klenov V.I.* O kolichestve rechnykh terras [On the number of river terraces: Longitudinal profile of rivers and their terraces]: / L.V. Borisevich (ed.). M.: Mosk. Philial VGO, 1978. P. 55–59. (In Russian)
- Krieger N.I.* Terrasovyye ryady: Nekotoryye itogi issledovaniy [Terrace series – some results of research]: Quantitative methods in geomorphology. M.: Geografiz, 1963. P. 20–33. (In Russian)
- Lilienberg D.A.* Obshchiye i regional'nyye zakonomernosti sovremennoy geodinamiki Kavkaza (po geomorfologicheskim i instrumental'nym dannym) [General and regional regularities of modern geodynamics of the Caucasus (basing on geomorphologic and instrumental data)]. Sbornik SDZK. Kiyev: Naukova dumka, 1980. P. 204–217. (In Russian)
- Маккавеев Н.И.* Сток и русловые процессы [Flow and channel processes]. Moscow: Izd-vo Mosk. University, 1971. 116 p.
- Матвеев Б.В., Панин А.В., Сидорчук А.Ю.* Razvitiye antetsedentnoy doliny r. Yany na uchastke peresecheniya Kularskogo khrebta. [Development of the antecedent valley of the Yana River at the intersection of the Kular ridge] // Geografiya i prirodnyye resursy, 1992. № 1. P. 102–107. (In Russian)
- Milanovsky E.E.* Noveyshaya tektonika Kavkaza [The recent tectonics of the Caucasus]. M.: Nedra, 1968. 483 p. (In Russian)
- Nikolayev N.I.* Neotektonika i yeyo vyrazheniye v strukture i rel'yefe territorii SSSR. [Neotectonics and its effects in the structure and topography of the USSR territory]. M.: Gosgeoltekhizdat, 1962. 392 p. (In Russian)
- Нижняя Волга: геоморфология, палеогеография и русловая морфодинамика [Lower Volga River: geomorphology, paleogeography and channel morphodynamics] / G.I. Rychagov, V.N. Korotaev, (eds.). Moscow: GEOS, 2002. 242 p. (In Russian)
- Penck W.* Morphological analysis. M.: Geografiz, 1961. 360 p. (In Russian)
- Shultz S.S.* Opyt geneticheskoy klassifikatsii rechnykh terras [Attempt of the genetic classification of river terraces] Izvestiya Vsesoyuzn. geogr. ob-va. 1940. Vol. 92. № 6. P. 739–749. (In Russian)
- Trofimov A.M., Moskovkin V.M.* Matematicheskoye modelirovaniye v geomorfologii sklonov [Mathematical modelling in the geomorphology of slopes]. Kazan: Izd-vo Kazan. un-ta, 1983. 218 p. (In Russian)
- van den Berg M.W., van Hoof Ton* The Maas terrace sequence at Maastricht, SE Netherlands: evidence for 200 m of late Neogene and Quaternary surface uplift // River Basin Sediment Systems: Archives of Environmental Change. A.A. BALKEMA PUBLISHERS. 2001. P. 45–86.

Received 28.08.2018

Revised 15.05.2019

Accepted 12.09.2019