

УДК 551.435.1.013(234.9)

А.Э. Алексеева¹, А.В. Ершов², Д.Н. Линева³

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЫМАНИЯ И ПРОЦЕССОВ ЭРОЗИИ ОРОГЕНА ЗАПАДНОГО КАВКАЗА В НЕОГЕН-ЧЕТВЕРТИЧНОЕ ВРЕМЯ⁴

Предложен алгоритм для моделирования воздымания и процессов речной и склоновой эрозии горного сооружения. Алгоритм реализован в виде программного кода, с использованием которого выполнено численное моделирование воздымания и эрозии орогена Западного Кавказа в неоген-четвертичное время. Высокая степень сходства модельных и наблюдаемых рельефа и конфигурации речной сети свидетельствует о принципиальной возможности использовать разработанные алгоритмы для моделирования реальных объектов.

Ключевые слова: численное моделирование, эрозия орогена, Западный Кавказ.

The technique for modeling of uplift and orogenic slope and river erosional processes is adopted. The software based on the adopted technique is realized. The code is used to model processes of uplift and erosion of Western Caucasus orogen at Neogene-Quaternary time. High level of correspondance between modeled and observed relief and river network configuration testifies to principal possibility of use of the technique for real world objects modeling.

Key words: numerical modeling, erosion of orogenic belt, West Caucasus.

Введение. Неотектонический этап развития орогена Большого Кавказа изучен достаточно хорошо [Милановский, 1968; Несмеянов, 1992; Короновский и др., 1997; Ломизе, 1987; Никишин и др., 2005], в частности, представлены оценки величины воздымания орогена на неотектоническом этапе [Милановский, 1968; Несмеянов, 1992]. При этом совместное моделирование воздымания и процессов эрозии орогена Большого Кавказа прежде не проводилось.

В статье представлены результаты численного моделирования воздымания и процессов склоновой и речной эрозии орогена Западного Кавказа в неоген-четвертичное время.

Процессы эрозии в горных областях определяются главным образом тектоническими условиями, климатом и геоморфологическими особенностями. Алгоритмы численного моделирования процессов эрозии и транспортировки осадков в горных сооружениях к настоящему моменту уже достаточно хорошо разработаны и описаны в публикациях. Модели различаются набором управляющих факторов, определяющих величину скорости эрозии. Так, в работе [Simoes et al., 2010] было принято, что скорость эрозии зависит от градиента рельефа и количества переносимого речным потоком осадочного материала (причем эрозия будет иметь место только тогда, когда количество переносимого осадка больше некоторой критической

величины). В модели К. Виппла и Б. Мида [Whipple, Meade, 2004] скорость эрозии была задана пропорционально ширине орогена и среднему градиенту рельефа. В работах [Whipple, Tucker, 1999; Tucker, 2004; Godard, Cattin, 2004; Lague et al., 2008; Attal et al., 2011; DiBiase, Whipple, 2011], помимо прочего, учтена и величина сдвигового напряжения между потоком осадка и породой, по которой он перемещается.

Мы в целом следовали подходу, изложенному в работе [Wilgoose, Riley, 1998], для моделирования процессов эрозии горного сооружения орогена Западного Кавказа. Этот подход предполагает выполнение на каждом временном шаге двух последовательных вычислений: 1) расчета склоновой эрозии и транспортировки осадков с использованием уравнения диффузии, 2) расчета эрозии и переноса осадка речными потоками. Часть использованных нами соотношений для нахождения скорости эрозии обоснована в работах [Tucker, 2004; Attal et al., 2011].

Методы исследований. Как сказано выше, эрозия горного сооружения определяется двумя основными процессами [Wilgoose, Riley, 1998] — склоновой эрозией и эрозией речными потоками. Склоновая эрозия представляет собой плоскостной смыв, т.е. удаление частиц почвы или верхнего слоя коры выветривания талой либо дождевой водой, которые стекают по склону сплошным слоем, в результате чего сам склон выпо-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, магистрант; *e-mail:* shurka020691@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, доцент; *e-mail:* and@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, аспирант; *e-mail:* d.n.linev@gmail.com

⁴ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-05-00471). Авторы благодарны профессору А.М. Никишину за содействие в работе, ценные советы, обсуждение результатов и предоставленные данные.

лаживается. Речная эрозия представляет собой процесс разрушения горных пород поверхностными водами, который приводит к расчленению рельефа земной поверхности с образованием разнообразных эрозийных форм. В природе эти процессы действуют одновременно и взаимодействуют между собой. Таким образом, для моделирования эрозии горного сооружения необходимо выполнить совместное моделирование процессов склоновой эрозии и эрозии речными потоками с учетом одновременно протекающего тектонического воздымания региона.

Численно модель роста и эрозии горного сооружения рассчитывалась на прямоугольной сетке, в каждом узле которой задавались значения рельефа в данной точке. Расчет выполнялся в направлении вперед во времени последовательно от начального момента времени с заданным временным шагом. На каждом временном шаге сначала наращивали рельеф в каждой ячейке расчетной сетки, величина наращивания равна скорости тектонического воздымания в данной точке в данный момент времени, помноженной на величину шага по времени, затем последовательно рассчитывали процессы склоновой эрозии и эрозии речными потоками.

Воздымание. Воздымание горного сооружения в модели задается кинематически через задание начального рельефа области (рельефа на момент начала счета) и через задание скорости тектонического воздымания в каждой точке расчетной области, зависящей от латеральных координат и от времени. Данные о значениях скорости воздымания за тот или иной период геологического времени берутся из независимых реконструкций, например таких, как реконструкция неотектонических движений Западного Кавказа, выполненная С.А. Несмеяновым [Несмеянов, 1992].

Мы использовали данные о величине тектонического воздымания Западного Кавказа для олигоцен-четвертичного времени, предоставленные А.М. Никишиным. Величины воздымания получены на основе результатов трекового анализа апатита (АФТА), позволяющих оценить величину эрозии. Значения скорости неотектонического воздымания территории (м/млн лет) получены делением суммы значений высоты современного рельефа и оценочных значений величины эрозии на протяженность времени воздымания (34 млн лет).

Склоновая эрозия и перенос осадка. Модель склоновой эрозии рассчитывалась на основе численного решения уравнения диффузии с постоянным коэффициентом:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = K \nabla^2 z = K \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right),$$

где x и y — координаты текущей точки в плане, z — значение высоты в текущей точке, t — время, K — коэффициент диффузии.

Уравнение диффузии численно решали с помощью явной конечно-разностной схемы на прямоугольной сетке. В качестве граничных условий принимали за-

данное значение высоты рельефа, при этом область моделирования выбрана достаточно большой, чтобы включить весь ареал, в пределах которого происходит воздымание, и так, чтобы края области находились на некотором удалении от ареала воздымания.

Эрозия и транспортировка осадков речными потоками. Для моделирования речной эрозии мы использовали оригинальный двустадийный алгоритм, в основном аналогичный алгоритму, предложенному в работах [Tucker, 2004; Attal et al., 2011].

На каждом временном шаге последовательно рассчитывали речной сток, а затем эрозию и транспортировку осадков, определяемую речным стоком.

Для расчета речного стока использован клеточный автомат, включающий все ячейки расчетной сетки. В начале временного шага в каждую ячейку «накидывалось» некоторое количество осадков, равное усредненной величине среднегодового количества атмосферных осадков, определяемой на основе палеоклиматических реконструкций, помноженной на размер временного шага (в годах). Затем определяли траекторию течения осадка следующим образом: для каждой ячейки находили «наименьшего соседа» — одну из 8 соседних ячеек, которые окружают расчетную ячейку, находящуюся в наинизшем гипсометрическом положении. После этого количество «воды» в ячейке транспортировалось в найденную соседнюю ячейку вдобавок к той «воде», которая там уже имела. Если текущая ячейка сама находилась в наинизшем гипсометрическом положении, то дальнейшее перемещение содержащейся в ней «водной массы» не производили. При достижении границы расчетной сетки «водную массу», достигшую граничной ячейки, отправляли за границу расчетной сетки. Работа клеточного автомата продолжалась до тех пор, пока все «выпавшие» атмосферные осадки или покидали область моделирования, или прекращали движение в локальных «минимумах» (понижениях) рельефа. При этом в каждой ячейке фиксировалось количество прошедшей через эту ячейку условной водной массы.

Расчет эрозии и транспортировки осадков водными потоками основан на расчете водного стока. Мы использовали подход, представленный в работах [Tucker, 2004; Attal et al., 2011], в которых скорость речной эрозии определяется сдвиговым напряжением на эродируемой поверхности (τ), инициируемым водным потоком, причем эрозия имеет место только при превышении некоторого порогового сдвигового напряжения (τ_{ce}):

$$E = \begin{cases} k_b (\tau - \tau_{ce})^p & \text{при } \tau > \tau_{ce}, \\ 0 & \text{при } \tau \leq \tau_{ce}, \end{cases}$$

где E — скорость эрозии, м/год; k_b — коэффициент эрозии, м·Па^{-3/2}/год; τ — сдвиговое напряжение, Па; τ_{ce} — пороговое сдвиговое напряжение (значение, которое нужно преодолеть для того, чтобы началась эрозия), Па; p — константа, равная 3/2 (безразмерная величина).

Сдвиговое напряжение, инициированное водным потоком, зависит от расхода воды, ширины канала, уклона рельефа и шероховатости пород:

$$\tau = \rho g n_m^{\frac{3}{5}} \left(\frac{Q}{W} \right)^{\frac{3}{5}} S^{\frac{7}{10}},$$

где ρ — плотность воды, 1000 кг/м^3 ; μ — ускорение свободного падения, $9,8 \text{ м/с}^2$; n_m — коэффициент, характеризующий шероховатость пород, $\text{с/м}^{1/3}$; S — величина градиента рельефа (безразмерная величина); Q — расход воды, т.е. количество воды, протекающее через ячейку в единицу времени, $\text{м}^3/\text{с}$; W — ширина канала, м. Ширина канала в свою очередь также определяется расходом воды и градиентом рельефа:

$$W = k_w Q^{\frac{3}{8}} S^{-\frac{3}{16}},$$

где k_w — коэффициент ширины канала, $\text{м}^{-1/8} \text{ с}^{3/8}$.

Критическая величина сдвигового напряжения для частичного сноса материала (τ_c)

$$\tau_c = \tau_c^* \Delta \rho g D,$$

где τ_c^* — критическая величина сдвигового напряжения (безразмерная величина, равная $0,045$ для большинства турбулентных потоков); $\Delta \rho$ — разница плотности между потоком воды и осадком (1650 кг/м^3 для типичных кристаллических пород); D — размер зерна осадка, м.

Таким образом, на каждом шаге последовательно рассчитывались величины Q (расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$), S (градиент высоты), W (ширина канала, м), τ (величина сдвигового напряжения, Па) и значение скорости эрозии E (м/год). Далее значение E умножалось на текущее время и вычиталось из текущего значения рельефа, тем самым осуществлялся расчет высот рельефа,

измененного под действиями процессов эрозии и оползания.

Результаты моделирования. Представленные выше алгоритмы были реализованы в виде программного кода, который использован для моделирования воздымания и процессов эрозии орогена Западного Кавказа в неоген-четвертичное время. Исходными данными при моделировании служило распределение в пространстве и времени скорости тектонического воздымания, величина которой задавалась на основе оценки, предоставленной А.М. Никишиным, полученной на основе результатов трекового анализа апатита (рис. 1).

Расчет повторяли множество раз с систематически изменяющимися значениями параметров в уравнениях, определяющих скорость протекания процессов склоновой и речной эрозии, а именно q (количество выпавших осадков), k_w (коэффициент ширины канала), k_b (коэффициент эрозии), n_m (коэффициент шероховатости породы) и K (коэффициент диффузии). Из всего множества рассчитанных моделей выбрана модель с наилучшим соответствием между расчетным рельефом на современный момент времени и наблюдаемым современным рельефом Западного Кавказа (рис. 2, 3).

Эта модель характеризуется следующими значениями параметров: $q = 4 \text{ м/год}$ (что соответствует современной оценке максимального среднегодового количества осадков на Западном Кавказе, которое составляет $\sim 4000 \text{ мм/год}$), $k_w = 1,5$ (что достаточно близко к оценкам $k_w = 2,1$ для территории Центральных Апеннин из работы [Attal et al., 2011]), $k_b = 0,000052$ (это значение на порядок выше значения $k_b = 0,0000052$ для Центральных Апеннин [там же]), что может быть

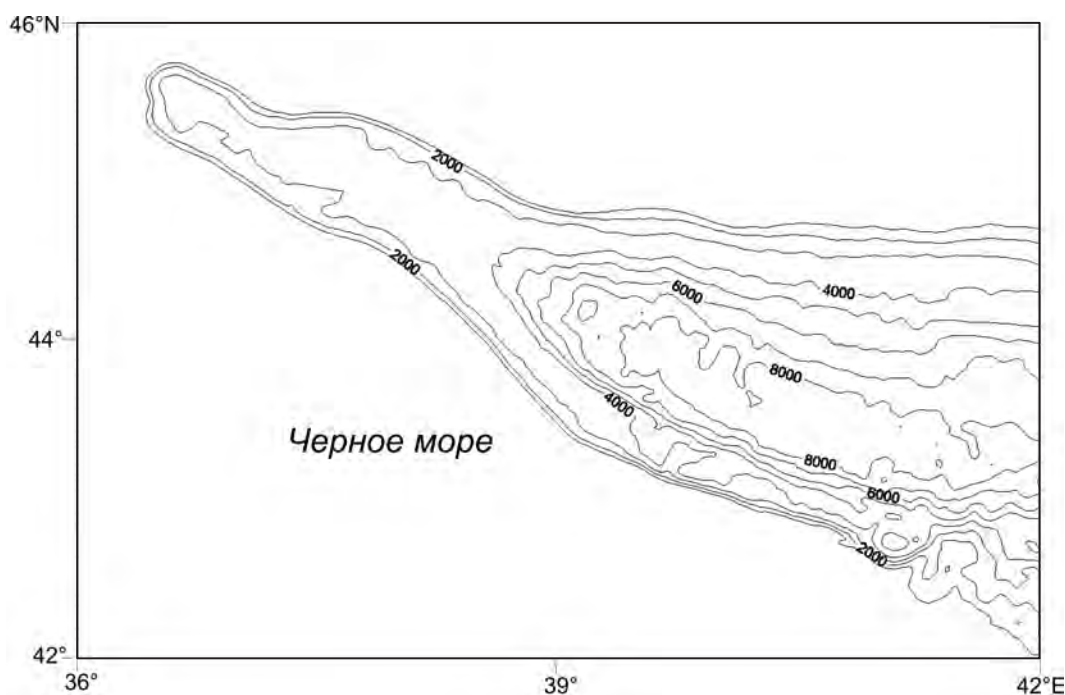


Рис. 1. Контурная карта величины неотектонического воздымания, построенная на основе данных, предоставленных А.М. Никишиным

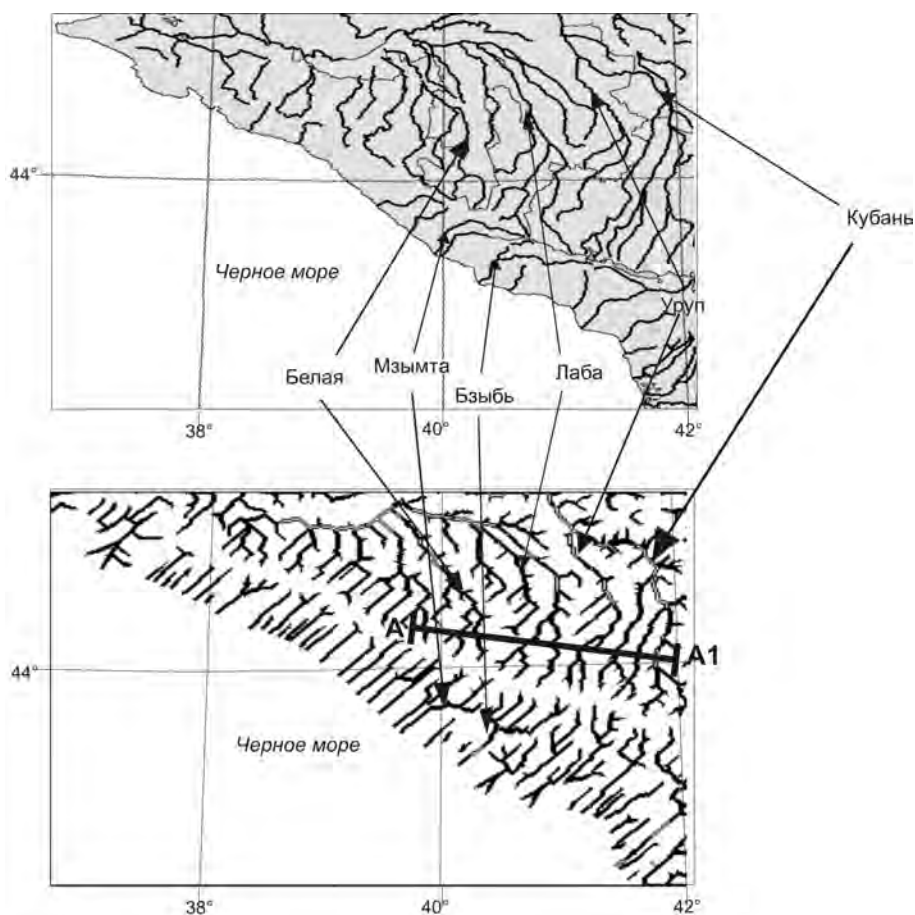


Рис. 2. Сопоставление современной орографической карты (вверху) с картой рек, полученной в модели (внизу)

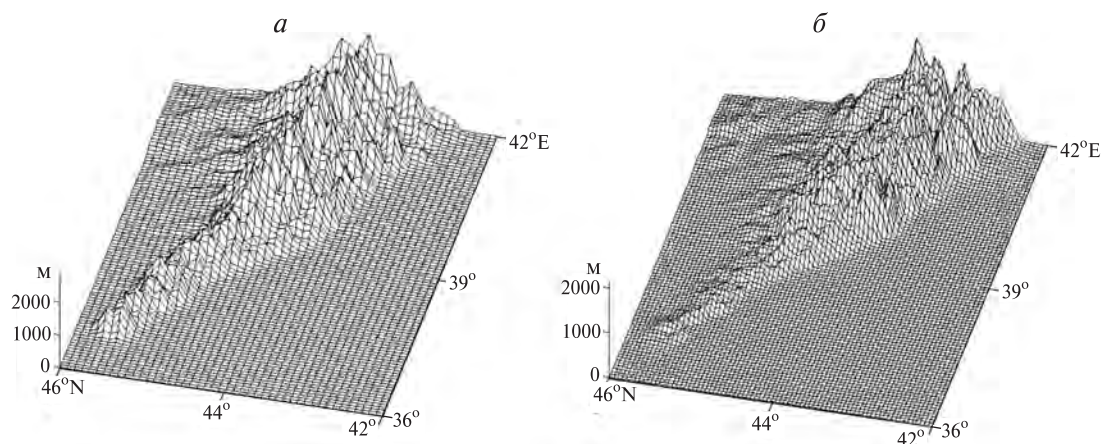


Рис. 3. Блок-диаграммы современного рельефа Западного Кавказа — расчетного (а) и наблюдаемого (б)

связано с различием в растительном покрове, прочности эродируемых горных пород и почти на порядок различающимся среднегодовым количеством осадков (для Апеннин 600—800 мм/год), значение коэффициента диффузии K было принято равным 1, коэффициент n_m , характеризующий шероховатость пород, взят со значением 0,5.

Сопоставление карты речной сети современного Западного Кавказа с картой речной сети, полученной нами в модели (рис. 2), показывает, что географиче-

ская локализация и пространственная конфигурация наиболее крупных рек северного и южного склонов Западного Кавказа достаточно хорошо воспроизводятся в модели, например, на модельной карте рек отчетливо различаются модельные аналоги рек Кубань, Белая, Лаба и др. (рис. 2). При этом модельная речная сеть несколько более густая по сравнению с речной сетью на географической карте.

Сравнение конфигурации речной сети на разных временных этапах показывает, что географическое рас-

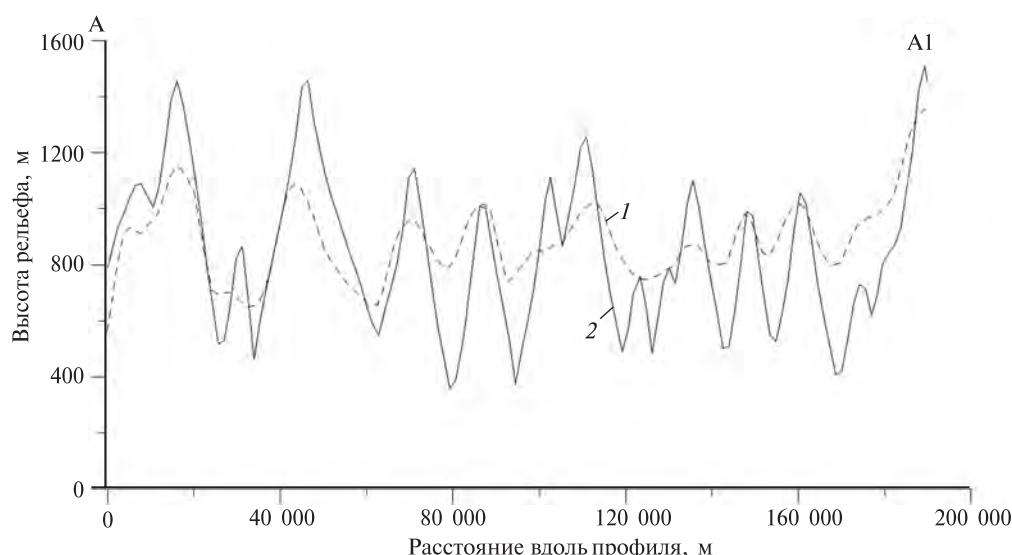


Рис. 4. Профили рельефа по линии А—А1 (см. на рис. 2): 1 — наблюдаемый, 2 — расчетный

положение большинства крупных рек в модели почти не меняется со временем, т.е. развитие речной сети унаследовано в течение всего неотектонического этапа.

Сравнение блок-диаграмм (рис. 3) и профилей (рис. 4) современного рельефа Западного Кавказа (расчетного и наблюдаемого) демонстрирует, с одной стороны, высокую степень сходства модели и наблюдений в отношении пространственной локализации положительных и отрицательных форм рельефа, при этом наблюдаются некоторые отличия модельных и наблюдаемых значений амплитуды перепадов рельефа. Эти отличия, возможно, связаны с тем, что в модели не учитывалась латеральная и вертикальная изменчивость свойств эродируемых горных пород (плотность,

твердость и другие характеристики). Учет этой изменчивости ведет к зависимости параметров модели от пространственных координат и времени, что делает решаемые уравнения нелинейными.

Заключение. Высокая степень сходства модельного и наблюдаемого рельефа и конфигурации речных потоков свидетельствует о применимости разработанных алгоритмов для моделирования эволюции горных сооружений.

Качество модели может быть улучшено за счет учета глубинной и латеральной изменчивости свойств эродируемых пород и свойств подстилающих их образований, определяемых растительностью и климатическими факторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Короновский Н.В., Ломизе М.Г., Гуцин А.И. и др. Главные события в тектонической эволюции кавказского сегмента Средиземноморского складчатого пояса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1997. № 4. С. 5—12.

Ломизе М.Г. Региональные и глобальные события в развитии Кавказской геосинклинали // Геология и полезные ископаемые Большого Кавказа. М.: Наука, 1987. С. 21—35.

Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968.

Несмеянов С.А. Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа. М.: Недра, 1992.

Никишин А.М., Болотов С.Н., Еришов А.В. 400 миллионов лет геологической истории южной части Восточной Европы. М.: Геокарт: ГЕОС, 2005. С. 259—311.

Attal M., Cowie P.A., Whittaker A.C. et al. Testing fluvial erosion models using the transient response of bedrock rivers to tectonic forcing in the Apennines // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116, N F2. P. 1—17.

DiBiase R.A., Whipple K.X. The influence of erosion thresholds and runoff variability on the relationships among topography, climate, and erosion rate // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116, N F4. P. 1—17.

Godard V., Cattin R., Lavé J. Numerical modeling of mountain building: Interplay between erosion law and crustal rheology // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31, N 23. P. 1—5.

Lague D., Crave A., Davy P. Laboratory experiments simulating the geomorphic response to tectonic uplift // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 108, N B1. P. 1—20.

Simoës M., Braun J., Bonne S.T. Continental — scale erosion and transport laws: A new approach to quantitatively investigate macroscale landscapes and associated sediment fluxes over the geological past // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2010. Vol. 11, N 9. P. 1—22.

Tucker G.E. Drainage basin sensitivity to tectonic and climatic forcing: Implications of a stochastic model for the role of entrainment and erosion thresholds // Earth Surf. Process. Landforms. 2004. Vol. 29, N 2. P. 185—205.

Whipple K.X., Meade B.J. Controls on the strength of coupling among climate, erosion, and deformation in two-sided, frictional orogenic wedges at steady state // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109, N F1. P. 1—24.

Whipple K.X., Tucker G.E. Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104, N B8. P. 17661—17674.

Wilgoose G., Riley S.R. Application of a catchment evolution model to the prediction of long-term erosion on the spoil heap at Ranger uranium mine: Initial analysis // Supervising Scientist, Supervising Scientist Rep. Vol. 132. Canberra, 1998.

Поступила в редакцию
18.02.2014