
ЭКЗОГЕННАЯ ГЕОМОРФОЛОГИЯ

УДК 551.435.1(931.2)

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ РЕКИ ПРИ СУЩЕСТВЕННОМ ВЛИЯНИИ СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ (НА ПРИМЕРЕ р. ВАИПАОА, НОВАЯ ЗЕЛАНДИЯ)[#]

© 2025 г. А. Ю. Сидорчук^{1,*}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия

*E-mail: fluvial05@gmail.com

Поступила в редакцию 16.09.2024 г.

После доработки 09.12.2024 г.

Принята к публикации 15.02.2025 г.

Проведено исследование процессов аккумуляции наносов в верховьях реки при обильном поступлении наносов со склонов и последующего врезания реки в аккумулятивную толщу при прекращении подачи склоновых наносов. В качестве объекта исследования выбраны верховья р. Ваипаоа (Новая Зеландия), где такие процессы хорошо изучены, имеется морфометрическая, гидрологическая и седиментологическая информация. Применены численные методы решения уравнения деформации с использованием формулы К.В. Гришанина для расчета расхода влекомых наносов, региональные морфометрические зависимости и эмпирическая формула для скорости поступления наносов со склонов в верховья реки. Результатом является количественное описание как процессов аккумуляции наносов, так и процессов врезания в них речного потока. В условиях поступления наносов со склонов формировалась область аккумуляции наносов, которая во времени расширялась как вверх (регрессивно), так и вниз (трансгрессивно) по реке. Продольный профиль русла спрямлялся по хорде. Последующее врезание при прекращении подачи наносов происходило трансгрессивно, начиная с верхнего участка области аккумуляции. В результате формировалась цикловая хордовая терраса с уменьшением возраста вреза вниз по течению. В процессе врезания на поверхности террасы в средней и нижней частях шла аккумуляция наносов, которые, несмотря на последующий размыв, могли сохраняться в разрезе аллювиальной толщи. Применение численных методов позволяет проследить детали процессов формирования аккумулятивных отложений цикловых террас и врезания речных потоков в эти отложения.

Ключевые слова: уравнение деформации; численные методы; русло реки; поступление наносов со склонов; аккумуляция наносов; врезание русла; хордовая терраса

DOI: 10.31857/S2949178925030014

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе (Сидорчук, 2025) был представлен качественный анализ математических выражений, описывающих изменения во времени продольных профилей рек. Одним из разобранных вариантов является оценка влияния поступления наносов со склонов на трансформацию продольного профиля реки. Такая задача представляет как теоретический, так и практический интерес. Для равнинных рек характерно заилиение верховьев (исчезновение малых рек) в условиях современной

антропогенной активизации смыва почвогрунтов со склонов (Чернов, 1994, Голосов, Панин, 1998, Trimble, 1999). На горных реках разнообразные склоновые процессы приводят к формированию аккумулятивных тел в руслах, вызывающих подпоры и аккумуляцию русловых наносов (Виноградова и др., 2001; Marutani et al., 2001). Н. И. Маккавеев с коллегами (Маккавеев и др., 1955, 1961) провели серию физических экспериментов, в которых были получены аккумуляция наносов в русле в условиях подачи избыточного количества наносов в верховья основного потока и в притоки и размыв тела аккумуляции при прекращении поступления наносов. Математическое моделирование позволяет еще более подробно описать эти процессы как в целом для геоморфологического ландшафта (Willgoose, 2005), так и для конкретного объекта (Сидорчук и др., 2004). Целью предлагаемой

[#]Ссылка для цитирования: Сидорчук А.Ю. (2025) Формирование продольного профиля реки при существенном влиянии склоновых процессов (на примере р. Ваипаоа, Новая Зеландия). *Геоморфология и палеогеография*. Т. 56. № 3. С. 359–371. <https://doi.org/10.31857/S2949178925030014>

статьи является решение этой задачи численными методами на примере верхнего течения р. Ваипаоа (Новая Зеландия), для которой имеется достаточно исходных данных для таких расчетов.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера возьмем хорошо исследованную р. Ваипаоа (рис. 1) на северо-востоке Северного о-ва Новой Зеландии (Trustrum et al., 1999). Площадь водосбора реки составляет 1910 км², перепад высот в бассейне 1010 м. По данным метеостанции Текарака, расположенной в долине на высоте 40 м абр., в центральной среднегорной части водосбора выпадает 1100 мм осадков в год, с максимальными значениями 110–120 мм в месяц в июле–августе. В среднем 146 дней в году суточный слой осадков превышает 1 мм (данные с сайта weatherandclimate.com). Среднегодовой расход на водомерном посту Канаканайя (с площадью водосбора 1560 км²) – 32 м³/с за период 1973–2023 гг. (данные с сайта hydrowebportal.niwa.co.nz), актуальные расходы воды (средние за час) варьировали в этот период с 2–3 до 2545 м³/с.

Большая часть водосбора р. Ваипаоа сложена третичными песчаниками и алевролитами. В верховьях реки развиты меловые и раннетретичные алевролиты, сильно тектонически деформированные и легко разрушающиеся даже в невыветреном состоянии (Marden et al., 2007). Эти алевролиты являются основными источниками поступления в русло как крупных, так и мелких наносов в результате интенсивных склоновых процессов – множественных неглубоких оползней и линейной эрозии на склонах. До прихода европейцев территория была покрыта лесом, р. Ваипаоа в верховьях меандрировала. Наносы, поступающие со склонов, в основном транзитом проходили по коренному ложу реки. Антропогенное воздействие, главным образом вырубка леса, привело к массовому поступлению слабо окатанных наносов (в основном щебня) со склонов. Совокупная площадь этих голых склонов невелика по сравнению с площадью речного бассейна, но в областях уменьшения транспортирующей способности потока наносы начали аккумулироваться, а река начала разделяться на рукава. Измерения на гидрологических станциях в бассейне р. Ваипаоа и повторные нивелировки в ее основном русле и в руслах некоторых притоков показывают общую аккумуляцию крупных наносов и общее увеличение отметок дна русел рек (Gomez et al., 1998, 2001).

В настоящее время вдоль основного русла многие участки склонов с ранее активными склоновыми процессами засажены лесом. Интенсивное поступление наносов со склонов сохрани-

лось лишь на нескольких участках на притоках, в частности, наносы поступают с морфологически сложного склона (так называемого “оврага”) Тарндалль (рис. 2, “овраг” также отмечен стрелкой на рис. 1). В результате в последние годы в верховьях реки аккумуляция сменяется размывом русла (Rosser, Jones, 2022). Тем не менее, мощность аккумулятивной толщи в русле остается значительной, а в низовьях аккумуляция наносов еще продолжается.

При расходах воды менее 100 м³/с на в/п Канаканайя поступление наносов со склонов практически отсутствует (~95% времени). Сильные дожди приводят к обильному поступлению наносов со склонов (рис. 2), и после таких ливней в бытовом режиме наносы перемещаются потоком вниз по руслу, где происходит аккумуляция. Дискретность процесса поступления наносов со склонов в верховьях р. Ваипаоа фиксируется всеми исследователями (Trustrum et al., 1999).

Как было ранее указано, влияние склоновых процессов на эрозионно-аккумулятивные процессы в речных руслах характерно для многих речных бассейнов, как на равнинах, так и (особенно) в горах. Например, в монографии под редакцией Т.Мартини и др. (2001) приведены описания 21 речного бассейна в Тихоокеанском орогенном поясе, где такое влияние проявляется особенно отчетливо. Однако в бассейне р. Ваипаоа сочетание большого количества осадков, среднегорного рельефа и слабой устойчивости склонов приводят к очень большому стоку взвешенных (8.5 млн т в год на в/п Канаканайя по оценке М. Хикса с соавторами (Hicks et al., 2011)) и влекомых (0.26 млн т в год, по нашей оценке) наносов, или 5600 т/км² в год. На некоторых притоках модуль стока взвешенных наносов составляет 11500–32500 т/км² в год (Hicks et al., 2011). Это сравнимо с модулями стока рек Лёссового плато в Китае, что делает бассейн р. Ваипаоа уникальным объектом.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным методом решения задачи является анализ уравнения деформации Экснера (Exner, 1920) с поправками М. А. Великанова (1948, 1958) и с учетом поступления наносов со склонов (Сидорчук, 2025):

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = -\frac{1}{(1-\varepsilon)} \frac{\partial q_s}{\partial x} + \frac{\partial Z_W}{\partial t} \quad (1),$$

где $\frac{\partial Z}{\partial t}$ – изменение отметки дна русла Z во времени t , $\frac{\partial q_s}{\partial x}$ – изменение удельного (на единицу ширины русла) расхода влекомых наносов q_s по длине реки x (в натуральных координатах),

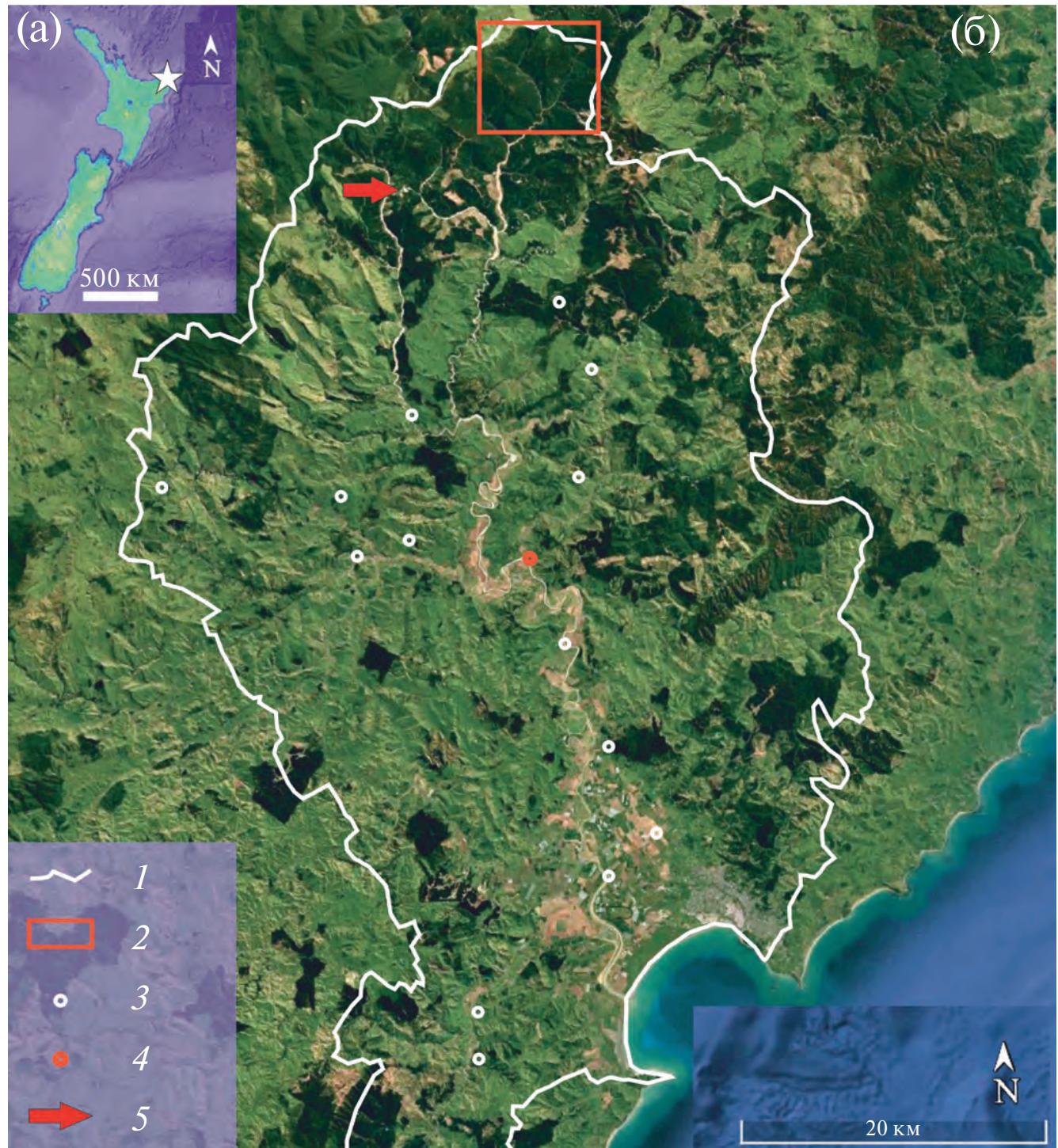


Рис. 1. Бассейн р. Ваипаоа (б) на Северном о-ве Новой Зеландии (отмечен звездочкой на вставке (а)). 1 — границы водосбора; 2 — область в верховьях, для которой проведены расчеты аккумуляции и размыва насыпей; 3 — водомерные посты; 4 — водомерный пост Канаканайя и метеостанция Те Карака; 5 — положение “оврага” Тарндаль.

Fig. 1. The Waipaao River basin (б) on the North Island of New Zealand (marked with an asterisk in inset (а)). 1 — drainage basin boundaries; 2 — upstream area for which sediment accumulation and erosion calculations were made; 3 — water gauging stations; 4 — Kanakanaia water gauging station and Te Karaka weather station; 5 — position of the Tarndal “gully”.



Рис. 2. Отложение и размыв продуктов склоновых процессов (оползней, быстрых сплыков, линейной эрозии) из “оврага” Тарндал в бассейне р. Верароа (приток р. Ваипаоа). Фото Н. Траструма.

Fig. 2. Deposition and erosion of slope process products (landslides, rapid slides, linear erosion) from the Tarndal “gully” in the upper Weraroa River (a tributary of the Waipaoa River). Photo by N. Trustrum.

$\frac{\partial Z_W}{\partial t}$ — изменение отметки дна за счет поступления в русло наносов с бортов речной долины и водосбора, ε — пористость донных отложений (речевого аллювия).

3.1. Составляющие уравнения деформации

Для решения уравнения (1) необходимо задать начальный продольный профиль русла (А), формулы для расчета удельного расхода влекомых наносов (Б) и интенсивности поступления наносов со склонов (В).

(А) Начальный продольный профиль в верховьях р. Ваипаоа и изменение площади водосбора вдоль линий тока получены с карты Северного о-ва Новой Зеландии масштаба 1:50000 с шагом горизонталей 20 м (рис. 3).

(Б) Удельный расход влекомых наносов некоторой фракции с диаметром D (м) (в расчетных формулах соответствует транспортирующей способности потока q_s в $\text{м}^2/\text{с}$, всегда ≥ 0) запишем по К. В. Гришанину (1972):

$$q_s = k \left(\frac{U}{U_{cr}} \right)^3 (U - U_{cr}) D \quad (2)$$

где U — средняя по вертикали скорость потока ($\text{м}/\text{с}$), k — коэффициент, значение которого по Гришанину равно 0.015, но требует калибровки для каждого конкретного объекта, U_{cr} — критическая скорость начала движения наносов ($\text{м}/\text{с}$), которая по Г.И. Шамову (1959), с учетом влияния глубины потока d (м), равна:

$$U_{cr} = k_{sh} D^{1/3} d^{1/6}, \quad (3)$$

где k_{sh} — размерный коэффициент. Если разность $U - U_{cr} \leq 0$, $q_s = 0$.

Крупность частиц влекомых наносов изменяется в широких пределах и обычно аппроксимируется логарифмически-нормальным распределением со средним логарифмическим диаметром $(\ln D)_{mean}$ и среднеквадратическим отклонением логарифмов диаметра $\sigma_{\ln D}$:

$$\frac{dp}{dD} = \frac{1}{D \sigma_{\ln D} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{[\ln D - (\ln D)_{mean}]^2}{2\sigma_{\ln D}^2} \right]. \quad (4)$$

Преобразуем формулу Гришанина таким образом, чтобы главными аргументами были основные



Рис. 3. Изменение отметок дна Z (1) и площади водосбора A (2) по длине реки в верховьях р. Ваипаоа.

Fig. 3. Change in channel bed altitudes Z (1) and catchment areas A (2) along the upper Waipaoa River.

ные гидролого-морфологические характеристики водосбора.

Скорость потока можно выразить через уклон и глубину потока с помощью формулы Шези-Маннинга:

$$U = \sqrt{S} \frac{d^{2/3}}{n} = \sqrt{-\frac{\partial z}{\partial x}} \frac{d^{2/3}}{n}, \quad (5)$$

где z — отметка свободной поверхности потока и S — уклон (равный производной по длине отметки свободной поверхности в направлении отрицательного градиента), n — коэффициент шероховатости русла.

Куб скорости потока тогда записывается как:

$$U^3 = UU^2 = -U \frac{d^{4/3}}{n^2} \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{qd^{1/3}}{n^2} \frac{\partial z}{\partial x}, \quad (6)$$

где q — удельный (на единицу ширины русла) расход воды $= Ud$ ($\text{м}^2/\text{с}$). Удельный расход наносов в этом случае выражается формулой:

$$q_s = -\frac{kq}{k_{sh}^3 n^2 d^{1/6}} \frac{\partial z}{\partial x} (U - U_{cr}). \quad (7)$$

Примечательно, что влияние гранулометрического состава на расход влекомых наносов учитывается только при вычислении неразмывающей скорости:

$$U_{cr} = k_{sh} d^{1/6} \int_{D_{min}}^{D_{max}} D^{1/3} f(D) dD. \quad (8)$$

Формула (1) записывается как:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial Z}{\partial x} \right) + \frac{\partial Z_W}{\partial t} \quad (9)$$

или

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial Z}{\partial x} + F \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial Z_W}{\partial t}, \quad (10)$$

где

$$F = \frac{kq}{(1-\varepsilon) k_{sh}^3 n^2 d^{1/6}} (U - U_{cr}). \quad (11)$$

Как следует из формулы (2), если скорость потока меньше критической, транспортирующая способность q_s , как и F равны нулю. В формулах (9) и (10) уклон свободной поверхности потока принят равным уклону дна русла, что возможно для усредненного продольного профиля реки.

Для вычисления q и d построены морфометрические связи с площадью водосбора A (км^2) и модулем стока M ($\text{м}^3/(\text{с км}^2)$):

$$q = 0.33A^{0.49} M^{0.72}, \quad (12)$$

$$d = 0.37A^{0.3} M^{0.37}. \quad (13)$$

Важно отметить, что в этих связях учитывается как изменение морфометрии русла при изменении расхода воды в створе (когда $A = \text{const}$, а меняется модуль стока M во времени), так и при изменении расхода воды по длине реки (когда модуль стока $M = \text{const}$, а $A = f(x)$). Они построены по данным измерений на водомерных постах в бассейне р. Ваипаоа с площадями водосбора от 3.6 до 1910 км^2 . Актуальный слой стока в первом приближении считается одинаковым для всего водосбора, его изменения во времени рассчитываются по гидрографам расходов воды Q_{kan} на водомерном посту Канаканайя (площадь водосбора 1560 км^2) за период продолжительностью 36 лет (1980–2022 гг., с пропусками). Текущий расход Q , который изменяется как во времени, так и по длине русла, рассчитывается как произведение модуля стока M ($\text{м}^3/(\text{с км}^2)$) на площадь водосбора A (км^2):

$$Q = MA = \frac{Q_{kan}}{1560} A. \quad (14)$$

Необходимые коэффициенты в формуле (11) получены по данным измерений в бассейне реки. Значение коэффициента $\frac{1}{1-\varepsilon} k = 0.007$ вычислено нами путем калибровки формулы (2) по данным наблюдений (Gomez et al., 1998) за изменениями морфологии русла, вызванными стоком влекомых наносов. Значение коэффициента $k_{sh} = 4.6$ — по (Шамов, 1959). Коэффициент в формуле Маннинга $n = 0.06$ выбран в таблице (Срибный, 1960) для горных рек. По данным о крупности влекомых наносов (7 мм) (Gomez et al., 2001) рассчитаны $(lnD)_{mean} = -4.96$, $\sigma_{lnD} = 1.4$; тогда интеграл по крупности наносов в формуле (8) равен 0.196. Следует подчеркнуть, что все коэффициенты (кроме k_{sh}) и связи сугубо региональные и не могут использоваться для других речных бассейнов.

(B) Скорость поступления склоновых отложений $\frac{\partial Z_W}{\partial t}$ в $\text{м}/\text{с}$ оценивалась по данным измерений Фуллера с соавторами (Fuller et al., 2011) для “оврага” Тарндалль. Была получена эмпирическая связь $\frac{\partial Z_W}{\partial t}$ с максимальными расходами воды Q_{max} ($\text{м}^3/\text{с}$) на в/п Канаканайя.

$$\frac{\partial Z_W}{\partial t} = 4.9 \cdot 10^{-8} Q_{max}^{0.41}. \quad (15)$$

Максимальные расходы определялись в периоды между измерениями объемов выносов со склонов (обычно до года). Применение формулы (15), выведенной для “оврага” Тарндалль, для описания процессов поступления наносов со склонов в верховьях основного русла реки Ваипаоа делает

расчеты изменения отметок продольного профиля сценарными только для условий, когда такое предположение считается верным.

3.2. Численное решение уравнения деформации

Способы численного решения уравнения Экснера (уравнение (1) без второго члена правой части) подробно рассмотрены Потаповым и Сингур (2019). Эти исследователи рекомендуют приводить уравнение (1) к параболическому (к уравнению (9) без последнего члена). Обычно задача трансформации продольного профиля реки так раньше и решалась — аналитически (Великанов, 1958), с помощью хорошо исследованного уравнения теплопроводности. Наши численные эксперименты с разными схемами показали, что хорошие результаты дает численное решение уравнения (1) напрямую с помощью простейшей явной схемы разностей назад (Самарский, 1983):

$$Z_i^{n+1} = Z_i^n - \frac{1}{(1-\varepsilon)} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[q_{s(i)}^n - q_{s(i-1)}^n \right] + \Delta Z_W^n(i), \quad (16)$$

где индекс n — изменение во времени, индекс i — изменение в пространстве. Эта схема менее точная, чем центральная, но более удобная для решения задачи с наличием поступления наносов разностей назад (Самарский, 1983):

Для устойчивости схемы в нашем случае поступления наносов со склонов в вершину реки должно выполняться условие невыхода наносов из ячейки длиной Δx за время Δt :

$$\frac{\Delta t(U - U_{cr})}{\Delta x} \leq 1. \quad (17)$$

Это условие для шага по длине 50–100 м и скорости движения наносов $(U - U_{cr})$ до 1–2 м/с дает шаг по времени как максимум 50 с, что следует учитывать при выборе машинного кода для решения задачи. Расчеты сопровождаются небольшой неустойчивостью, но при достаточно больших уклонах продольного профиля эта неустойчивость отметок дна русла не очень существенно влияла на результаты расчетов. Численные эксперименты показали, что такая неустойчивость устраняется периодическим скользящим осреднением рассчитанных отметок дна русла.

Верхним граничным условием является $\frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{\partial Z_W}{\partial t}$. Нижнее граничное условие можно принять $\frac{\partial Z}{\partial t} = -\frac{1}{1-\varepsilon} \frac{\partial q_s}{\partial x}$ в области минимума изменчивости транспортирующей способности потока в конце расчетного участка.

В рамках рассматриваемой задачи с расчетным периодом не более 1500 лет коренное ложе реки

считается неразмываемым. Поэтому при реализации схемы (16) важно учитывать возможность дефицита наносов при эрозии, когда частично обнажается коренное ложе, а градиент транспортирующей способности потока превышает доступное количество наносов:

$$\frac{1}{(1-\varepsilon)} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[q_{s(i)}^n - q_{s(i-1)}^n \right] \geq \Delta Z_W^n(i). \quad (18)$$

В таком случае в ходе расчета реализуется равенство левой и правой частей в формуле (18): рассчитанный размык равен доступному количеству наносов, которые полностью размываются.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

4.1. Полукачественная оценка процессов эрозии-аккумуляции

Целесообразно исследовать уравнение (10) на полукачественном уровне, отслеживая только изменения суммарных во времени значений членов этого уравнения по длине русла. Для ускорения вычислений возьмем период в 5 лет (рис. 4).

В уравнении (10) три члена правой части определяют знак изменений отметки дна — эрозию или аккумуляцию. Последний член — поступление наносов со склонов — равен нулю при расходе на в/п Канаканай меньше 100 м³/с и положителен в противном случае. Максимальный суммарный слой поступивших наносов составил около 5 м, общий объем (на единицу ширины русла) на протяжении 1.5 км — 4100 м².

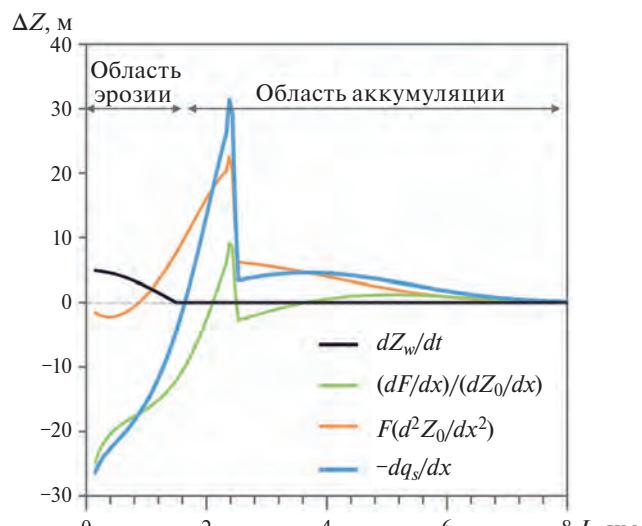


Рис. 4. Изменения по длине русла L суммарных за 5 лет значений членов уравнения (10), реализованных в виде изменений отметок дна ΔZ .

Fig. 4. Changes along the channel length L in the 5-year integrated values of the terms of equation (10), realized in the form of changes in the bed altitudes ΔZ .

Знаки суммы первых двух членов – изменения по длине транспортирующей способности потока, взятое со знаком минус ($-\frac{\partial q_s}{\partial x}$), показывает две области: область эрозии от 0 до 1.5 км и область аккумуляции далее по руслу. В области эрозии по модулю доминирует член $\frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial Z}{\partial x}$, знак этого члена (минус, за счет отрицательного градиента отметок дна) определяет направленность процесса изменения отметок дна.

Область эрозии практически совпадает с областью поступления наносов со склонов. Максимальный потенциальный слой выноса наносов в области эрозии, если бы была реализована транспортирующая способность потока, составил бы 26.5 м, а удельный объем – 24140 м³, что в 6 раз больше доступного количества склоновых наносов. Такое соотношение должно приводить к практически полному выносу из русла поступающих наносов на протяжении верхних 1.5 км и к формированию стока наносов на нижележащем участке.

Если рассматривать актуальное соотношение притока наносов со склонов, которое происходит импульсами, с транспортирующей способностью потока при расходах воды более 100 м³/с на в/п Канаканайя, то, как и следовало ожидать, в периоды активизации склоновых процессов на верхнем участке русла происходит аккумуляция наносов, а между этими периодами реализуется эрозия.

В области потенциальной аккумуляции ниже 1.5 км от истока реки по модулю доминирует член $F \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2}$, знак этого члена (плюс, за счет положительной кривизны продольного профиля русла) определяет направленность процесса изменения отметок дна. Потенциальный удельный объем аккумуляции мог бы составить 27780 м³, т.е. близкий к потенциальному объему эрозии.

4.2. Численные эксперименты при наличии импульсов поступления склоновых наносов в русло

Проведены сценарные расчеты аккумуляции поступающих со склонов наносов для верховьев р. Ваипаоа с помощью уравнения (16). Сравнение рассчитанных за короткий период (несколько более 5 часов) изменений отметок продольного профиля р. Ваипаоа (рис. 5), когда расход воды был более 100 м³/с, и со склонов поступали наносы, с полукачественной оценкой таких изменений (см. рис. 4) показывает высокую степень соответствия этих двух оценок. Области эрозии полностью совпадают по протяженности и по от-

сутствию наносов при расчете численными методами, конфигурация изменений отметок дна в области аккумуляции также весьма сходная. Это показывает, что для небольших периодов, когда изменения уклонов и кривизны продольного профиля несущественны, полукачественные оценки трансформации продольных профилей рек дают хорошие результаты. С уменьшением расходов воды и прекращением интенсивных склоновых процессов в расчетный период 5.4–30 ч. накопленные наносы смещались вниз по руслу реки (рис. 5).

Если увеличить расчетное время (рис. 6), то изменения формы продольного профиля становятся существенными. Если расчетное время необходимо было продлить за 36 лет (до 180 лет), исходный ряд расходов воды повторялся необходимое количество раз без изменений значений расходов. Поступление наносов со склонов составило 645 м³/год. Рассчитанный объем аккумуляции составил 560 м³/год в начале расчетного периода и 450 м³/год в конце. В нижней части области аккумуляции, установленной полукачественными методами (см. рис. 4), происходила максимальная аккумуляция: за 180 расчетных лет она составила более 20 м. Уклон свободной поверхности уменьшился на 40% в верхней части расчетного участка и увеличился на 60% в его нижней части; сгладились неоднородности кривизны продольного профиля. Область аккумуляции наносов расширилась как вверх, так и вниз по реке (трансгрессивно–ретрессивно) от области максимальной аккумуляции.

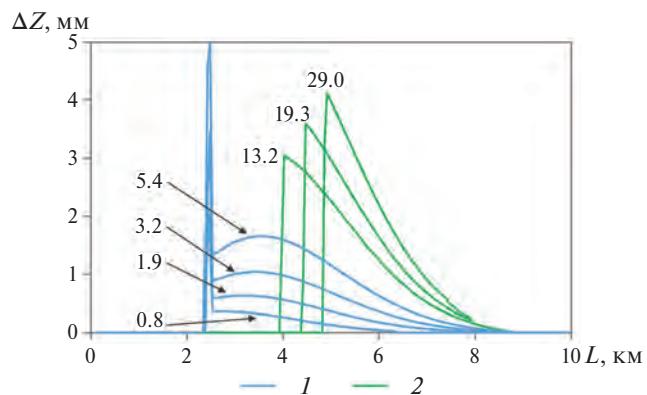


Рис. 5. Рассчитанное изменение отметок ΔZ по длине L продольного профиля р. Ваипаоа за 5.4 ч. при поступлении наносов со склонов (синие линии) и за последующие 24.6 ч. при отсутствии склоновых наносов (зеленые линии). Время (ч.) обозначено цифрами на графике.

Fig. 5. Calculated for 5.4 hours changes in longitudinal profile altitudes ΔZ along of the Waipaoa River length L with sediment input from the slopes (blue lines) and for the next 24.6 hours in the absence of slope sediment input (green lines). The numbers in the figure indicate the time in hours.

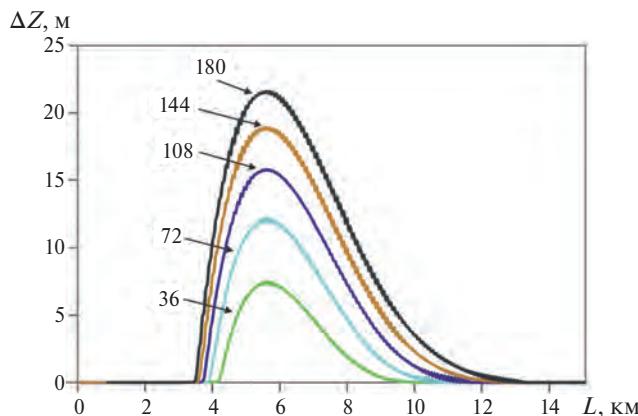


Рис. 6. Формирование тела аккумуляции мощностью ΔZ по длине L в верховьях р. Ваипаоа за расчетный период 180 лет. Время (годы) обозначено цифрами на графике.

Fig. 6. Formation of the accumulation body with the thickness ΔZ along the length L in the upper reaches of the Waipaao River for the calculated period of 180 years. The numbers in the figure indicate the time in years.

Численный анализ дает возможность проанализировать вероятные изменения положения областей эрозии и аккумуляции для разных климатических сценариев, а именно при изменениях величин стока воды и поступления склонового материала в русло реки. Расчеты проведены для периода времени 36 лет, были заданы увеличение величины стока воды в 2 раза при сохранении объема поступления наносов со склонов и увеличение объема поступления наносов со склонов в 2 раза при сохранении величины стока воды. Результаты численного эксперимента оказались вполне ожидаемыми. Увеличение объема стока при неизменном поступлении наносов со склонов (увлажнение климата) приводит к уменьшению объема аккумуляции и смещению аккумулятивного тела вниз по реке. И, напротив, увеличение поступления наносов со склонов при неизменном стоке воды приводит к увеличению объема аккумуляции и смещению области аккумуляции вверх по реке (рис. 7).

4.3. Численные эксперименты при прекращении поступления склоновых наносов в русло

После формирования тела аккумуляции на протяжении 180 лет в численном эксперименте была прекращена подача наносов со склонов в вершину реки. После этого расчет продолжался при повторяющихся рядах расходов воды (по 36 лет без изменений) еще 540 расчетных лет (рис. 8). Размытый происходил трансгрессивно, так что верхний край тела аккумуляции и область максимума аккумуля-

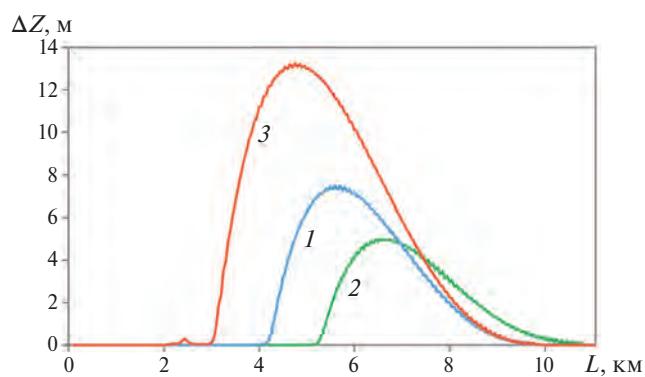


Рис. 7. Мощность ΔZ и форма тела аккумуляции по длине L в верховьях р. Ваипаоа: 1 — без изменения режима стока и поступления наносов; 2 — при увеличении величины стока воды в 2 раза при сохранении объема поступления наносов со склонов; 3 — при увеличении объема поступления наносов со склонов в 2 раза при сохранении величины стока воды.

Fig. 7. Thickness ΔZ and shape of the accumulation body along the length L in the upper reaches of the Waipaao River: 1 — without changing the runoff regime and sediment input; 2 — with a twofold increase in the discharge while maintaining the volume of sediment input from the slopes; 3 — a twofold increase in the volume of sediment input from the slopes while maintaining the discharge.

ции сместились вниз по реке примерно на 4 км, скорость размыва уменьшалась во времени от 222 до 104 м²/год. Одновременно происходила аккумуляция наносов в средней и нижней частях тела аккумуляции, нижний край сместился примерно на 2 км. Эта аккумуляция во времени последовательно трансгрессивно сменялась размывом. Продолжение расчетов показало, что полный размыв тела аккумуляции (92000 м²) произошел за 1150 расчетных лет.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчеты для верховьев р. Ваипаоа показали, что в исследованном случае для небольших расчетных периодов изменения уклонов и кривизны продольного профиля не оказали существенного влияния на величины и соотношения элементов уравнения (10). Поэтому элементарные вычисления изменения величин членов этого уравнения по длине реки при знании качественных характеристик этих членов дают возможность в первом приближении выявить области эрозии и аккумуляции наносов на продольном профиле. Вероятно, такие вычисления полезны при выборе участков реки для более точных расчетов деформации продольного профиля с целью принятия решений по использованию долины реки для хозяйственных нужд.

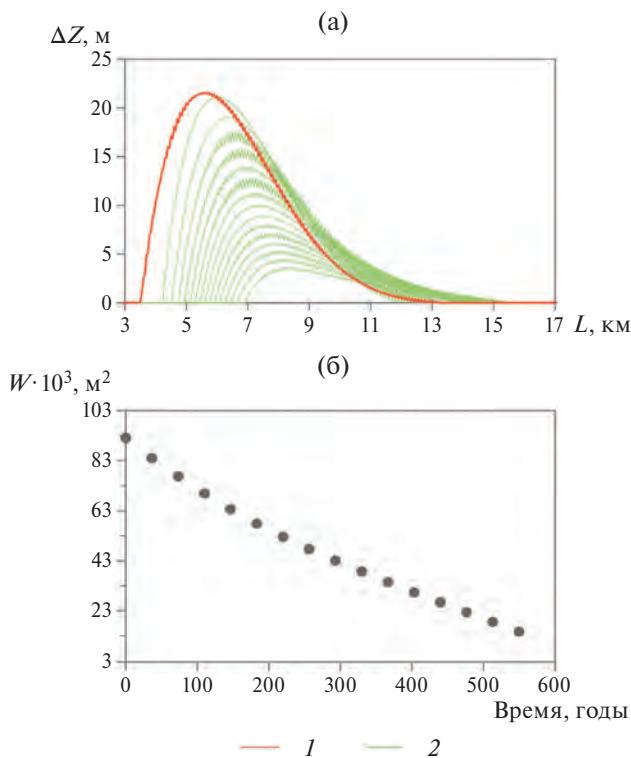


Рис. 8. Рассчитанный размыв тела аккумуляции на р. Ваипаоа за 540 расчетных лет (а) и изменение во времени объема тела аккумуляции (б).

1 — форма тела аккумуляции после 180 лет подачи наносов со склонов; 2 — последовательные изменения через каждые 36 лет.

Fig. 8. Calculated erosion of the accumulation body on the Waipaao River for 540 calculation years (a) and change in the volume of the accumulation body over time (b).

1 — the shape of the accumulation body after 180 years of sediment supply from the slopes; 2 — successive changes every 36 years.

Численный анализ с помощью разностных схем дает существенно больше информации о распределении областей эрозии и аккумуляции по длине реки, а главное, об изменениях их положения и протяженности во времени. Такой анализ совершенно необходим для последующих расчетов, например, уровней вод половодья и для определения зон затопления и подтопления в долине реки.

В условиях интенсивного поступления наносов со склонов в вершину реки происходит аккумуляция наносов. Во времени тело аккумуляции наносов регрессивно-трансгрессивно расширяется как вверх, так и вниз по реке от области максимума аккумуляции, так что в его верхней части уклон свободной поверхности уменьшается, а в нижней — увеличивается, и в целом сглаживаются неоднородности кривизны профиля. Геоморфологическим следствием таких изменений становится спрямление продольного профиля русла по хорде

(рис. 9а), о котором пишет А. Болиг (1956) при анализе аккумуляции наносов в русле в условиях развития и деградации оледенения. Н.И. Маккавеев с коллегами (1955, 1961) получили такую аккумуляцию по хорде в ходе физического эксперимента при подаче в русло избыточного количества наносов.

Если прекратить подачу наносов в вершину реки, тело аккумуляции размывается. Размыв происходит трансгрессивно, так что верхний край тела аккумуляции и область максимума смешаются вниз по реке. Скорость размыва в среднем более чем в 5 раз меньше скорости аккумуляции в период подачи наносов. Одновременно происходит трансгрессивная аккумуляция части наносов в средней и нижней частях тела аккумуляции, которая сменяется во времени трансгрессивной эрозией и заканчивается вместе с полным размывом аккумулятивного образования. Н.И. Маккавеев с коллегами (1955, 1961) получили такой размыв накопленных наносов в ходе физического эксперимента при прекращении подачи в русло избыточного количества наносов; в ходе общего размыва в этих экспериментах наблюдалась локальная аккумуляция. Геоморфологическим следствием таких изменений является формирование цикловой хордовой террасы, поверхность которой есть поверхность аккумулятивного тела, сформированного в период поступления наносов со склонов. Термин “хордовая терраса” был предложен Н.И. Маккавеевым (1956), им же даны описания формирования таких террас как при теоретических построениях, так и в натурных объектах. Расчеты показывают, что возраст вреза в эту террасу и, соответственно, возраст формирующихся при этом террас врезания, будут уменьшаться вниз по течению (рис. 9б). Расчет показывает полный размыв тех наносов, что локально аккумулировались в период общего размыва, однако здесь не учтены трехмерные эффекты аккумуляции и размыва наносов при трансформации продольного профиля реки. В результате аккумуляции днище речной долины расширяется, и наносы распределяются по все большей площади по мере увеличения отметок дна. При размыве процесс обратный: ширина русла при размыве в целом уменьшается, так что более молодые наносы в средней и нижней частях поверхности хордовой террасы, которые откладывались здесь при врезании русла выше по течению, вполне могут локально сохраняться при последующем трансгрессивном врезании русла в этих частях.

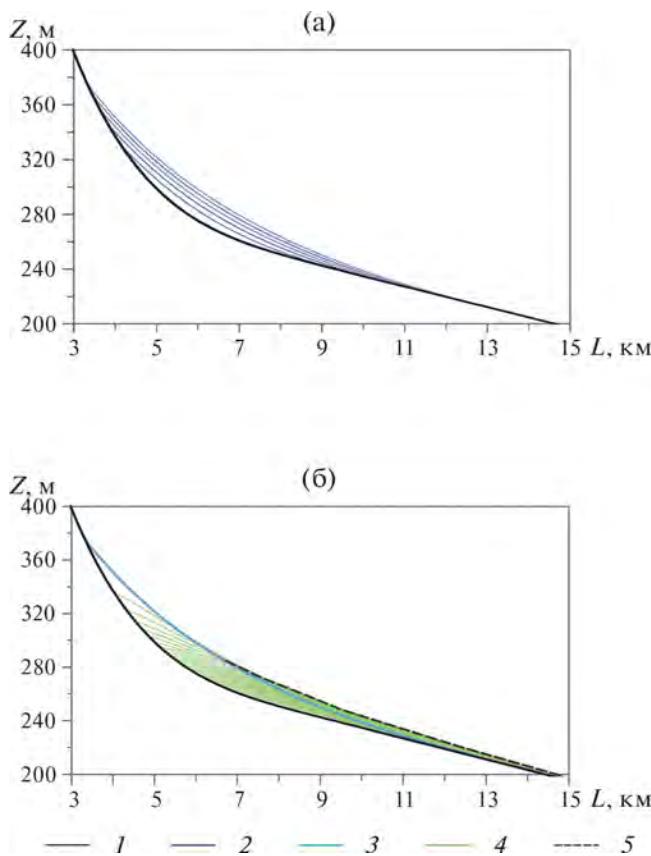


Рис. 9. Формирование хордовой аккумуляции в верховьях р. Ваипаоа при поступлении наносов со склонов (а) и образование цикловой хордовой террасы при прекращении поступления наносов (б).

1 — профиль коренного дна; 2 — последовательность аккумуляции наносов за 180 расчетных лет (диапазон времени между линиями 36 лет); 3 — поверхность тела аккумуляции и цикловой хордовой террасы; 4 — последовательность врезания за 1150 расчетных лет (диапазон времени между линиями 36 лет); 5 — область аккумуляции наносов в ходе врезания, которые частично затем размываются, а частично могут сохраняться в разрезе отложений хордовой террасы. Здесь Z — отметки дна русла, L — длина реки от верховий.

Fig. 9. Formation of chord accumulation in the upper reaches of the Waipaao River during sediment supply from the slopes (a) and formation of a cyclic chord terrace when sediment supply ceases (b).

1 — profile of the bedrock; 2 — sequence of sediment accumulation for 180 calculation years (the time range between the lines is 36 years); 3 — surface of the accumulation body and cyclic chord terrace; 4 — sequence of incision for 1150 calculated years (time range between lines is 36 years); 5 — the section of accumulation of sediments during incision, which are then partially washed away, and partially can be preserved in the chord terrace deposits. Here Z — channel bed altitudes, L — river length along the upper reach.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет численными методами продольного профиля небольшого малопроточного участка русла в верховьях реки показывает большие возможности этого подхода. Результаты расчетов для коротких периодов показывают возможность предварительного полукачественного анализа положения областей эрозии и аккумуляции в речном русле. Расчеты для длительных периодов времени позволяют выяснить все детали трансформации продольного профиля реки: аккумуляцию в русле в условиях интенсивного поступления наносов со склонов, размыв аккумулятивного тела при прекращении поступления склоновых наносов и особенности формирования хордовых террас.

Дальнейшие расчеты численными методами для бассейна р. Ваипаоа (Новая Зеландия) могут быть направлены на рассмотрение процессов формирования хорошо выраженных и детально описанных (Bergman et al., 2000) цикловых хордовых террас этой реки при климатических изменениях четвертичного периода.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121051100166-4 “Гидрология, морфодинамика и геоэкология эрозионно-русловых систем”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болиг А. (1956) Очерки геоморфологии. М.: Изд-во иностр. лит. 262 с.
- Великанов М.А. (1948) Гидрология суши. Л.: Гидрометеоиздат. 530 с.
- Великанов М.А. (1958) Русловой процесс (основы теории). М.: Физматгиз. 395 с.
- Виноградова Н.Н., Крыленко И.В., Сурков В.В., Тарбеева А.М. (2010) Ледниковые реки Приэльбрусья — условия руслоформирования и взаимосвязь морфодинамики долин и русел. В сб.: Эрозия почв и русловые процессы. Т. 17. М.: Геогр. ф-т МГУ. С. 96–115.
- Голосов В.Н., Панин А.В. (1998) Пространственно-временные закономерности деградации речной сети на Восточно-Европейской равнине. В сб.: Труды Академии водохозяйственных наук. Вып. 5. Гидрология и русловые процессы. С. 163–172.
- Гришанин К.В. (1972) Теория руслового процесса. М.: Транспорт. 215 с.
- Маккавеев Н.И. (1956) Влияние стока на продольные профили реки. В сб.: Вопросы географии. Сборник статей для XVII Международного географического конгресса. М.—Л.: Изд-во АН СССР. С. 199–205.

- Маккавеев Н.И., Капица А.П., Хмелева Н.В. (1955) Экспериментальные исследования процессов развития продольного профиля реки. *Вестник МГУ. Серия физико-математических и естественных наук.* № 2. С. 139–151.
- Маккавеев Н.И., Хмелева Н.В., Заитов И.Р., Лебедева Н.В. (1961) Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ. 193 с.
- Потапов И.И., Снигур К.С. (2019) О решении уравнения Экснера для дна, имеющего сложную морфологию. *Компьютерные исследования и моделирование.* Т. 11. № 3. С. 449–461. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2019-11-3-449-461>
- Самарский А.А. (1983) Теория разностных схем. М.: Наука. 616 с.
- Сидорчук А.Ю. (2025) Процессы формирования продольного профиля реки. *Геоморфология и палеогеография.* Т. 56. № 2. С. 185–196. <https://doi.org/10.31857/S2949178925020017>
- Сидорчук А.Ю., Виноградова Н.Н., Крыленко И.В. (2004) Трансформация продольного профиля р. Баксан у г. Тырныауз после прохождения катастрофического селя. В сб.: *Труды VI конференции “Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей”.* М.: ИВП РАН. С. 461–464.
- Срибный М.Ф. (1960) Формулы средней скорости течения рек и их гидравлическая классификация по со-противлению движению. В сб.: *Исследование и комплексное использование водных ресурсов.* М.: Изд-во АН СССР. С. 204–220.
- Чернов А.В. (1994) Заилиение русел малых рек Европейской России и сопредельных государств. *Геоморфология.* № 1. С. 100–107.
- Шамов Г.И. (1959) Речные наносы. Л.: Гидрометеоиздат. 378 с.
- Berryman K., Marden M., Eden D. et al. (2000) Tectonic and paleoclimatic significance of Quaternary River terraces of the Waipaoa river, east coast, North Island, New Zealand. *N. Z. J. Geol. Geophys.* Vol. 43. Iss. 2. P. 229–245. <https://doi.org/10.1080/00288306.2000.9514883>
- Exner F.M. (1920) Zur physik der dünen. Akad. Wiss. Wien Math. Naturwiss. Klasse. Vol. 129 (2a). P. 929–952.
- Fuller I.C., Basher L., Marden M., Massey C. (2011). Using morphological adjustments to appraise sediment flux. *J. of Hydrology (New Zealand).* Vol. 50. No. 1. P. 59–79. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.315172004256339>
- Gomez B., Eden D.N., Peacock D.H., Pinkney E.J. (1998) Floodplain construction by recent, rapid vertical accretion: Waipaoa River, New Zealand. *Earth Surf. Processes Landforms.* Vol. 23. P. 405–413. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199805\)23:5<405::AID-ESP854>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199805)23:5<405::AID-ESP854>3.0.CO;2-X)
- Gomez B., Rosser B., Peacock D.H. et al. (2001) Downstream fining in a rapidly aggrading gravel bed river. *Water Resour. Res.* Vol. 37. Iss. 6. P. 1813–1823.
- Hicks D.M., Shankar U., McKerchar A.I. et al. (2011) Suspended sediment yields from New Zealand rivers. *J. of Hydrology: New Zealand.* Vol. 50. Iss. 1. P. 81–142.
- Marden M., Mazengarb C., Palmer A. et al. (2008) Last glacial aggradation and post glacial sediment production from the non-glacial Waipaoa and Waimata catchments, Hikurangi margin, North Island, New Zealand. *Geomorphology.* Vol. 99. Iss. 1–4. P. 404–419. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.12.003>
- Marutani T., Brierley G., Trustrum N., Page M. (Eds.) (2001) Source-to-sink sedimentary cascades in Pacific Rim geo-systems. Matsumoto Sabo Work Office, Japan: Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 184 p.
- NIWA Hydro Web Portal for Hydrometric and Water Quality data [Electronic data]. URL: <https://hydrowebportal.niwa.co.nz> (access date: 05.09.2024).
- Rosser B.J., Jones K.E. (2022) Application of LiDAR differencing to assess sediment load in the upper Waipaoa River, 2005 to 2019. GNS Science Consultancy Report 2021/102 September 2022 [Electronic data]. URL: <https://www.envirolink.govt.nz/assets/Envirolink> (access date: 01.08.2024).
- Trimble S.W. (1999) Decreased rates of alluvial sediment storage in the Coon Creek basin, Wisconsin, 1975–93. *Science.* Vol. 285. Iss. 5431. P. 1244–1246. <https://doi.org/10.1126/science.285.5431.1244>
- Trustrum N.A., Gomez B., Page H.J. et al. (1999) Sediment production, storage and output: the relative role of large magnitude events in steepland catchments. *Zeitschrift für Geomorphologie (Suppl.).* Vol. 115. P. 71–86.
- Weather and Climate [Electronic data]. URL: <https://weatherandclimate.com/new-zealand/gisborne-te-karaka> (access date: 05.09.2024).
- Willgoose G.R. (2005) Mathematical modeling of whole landscape evolution. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* Vol. 33. P. 443–459. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122610>

THE FORMATION OF RIVER LONGITUDINAL PROFILE UNDER THE SIGNIFICANT INFLUENCE OF SLOPE PROCESSES (ON THE EXAMPLE OF THE WAIPAOA RIVER, NEW ZEALAND)¹

A. Yu. Sidorchuk^{a,*}

^a*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: fluvial05@gmail.com*

The article studies sediment accumulation processes in the upper reaches of a river with abundant sediment supply from slopes and subsequent river incision into the accumulative strata when the supply of slope sediments ceases. The object of study is the upper reaches of the Waipaoa River (New Zealand), where such processes are well studied and morphometric, hydrological and sedimentological information is available. The deformation equation using the Grishanin formula for calculating the transport rate of bedload was solved using numerical methods, regional morphometric relationships and an empirical formula for the rate of sediment supply from slopes to the head of the river. The result is a quantitative description of both sediment accumulation processes and the processes of river incision into them. Under conditions of sediment supply from slopes, a sediment accumulation area was formed, which expanded over time both upwards (regressively) and downwards (transgressively) along the river. The longitudinal profile of the channel straightened along the chord. Subsequent incision upon cessation of sediment supply occurred transgressively, starting from the upper section of the accumulation area. As a result, a cyclic chord terrace with time-transgressive downstream incision was formed. During the incision, sediments accumulated on the surface of the terrace in the middle and lower parts, which, despite subsequent erosion, could be preserved in the section of the alluvial layer. The use of numerical methods allows us to trace the details of the processes of formation of accumulative deposits of cyclic terraces and the incision of river flows into these deposits.

Keywords: equation of deformation; numerical methods; river channel; sediment supply from slopes; sediment accumulation; channel incision; chord terrace

ACKNOWLEDGMENTS

The study was done under the state budget task No. 121051100166-4 "Hydrology, morphodynamics and geoecology of erosion-channel systems".

REFERENCES

- Baulig H. (1956) Ocherki geomorfologii (Essays on Geomorphology). Moscow: Inostr. lit. (Publ.). 262 p (in Russ).
- Berryman K., Marden M., Eden D. et al. (2000) Tectonic and paleoclimatic significance of Quaternary River terraces of the Waipaoa river, east coast, North Island, New Zealand. *N. Z.J. Geol. Geophys.* Vol. 43. Iss. 2. P. 229–245.
<https://doi.org/10.1080/00288306.2000.9514883>
- Chernov A.V. (1994) Silting of small river channels in European Russia and adjacent countries. *Geomorfologiya*. No. 1. P. 100–107 (in Russ).
- Exner F.M. (1920) Zur physik der dünen. Akad. Wiss. Wien Math. Naturwiss. Klasse. Vol. 129 (2a). P. 929–952.
- Fuller I.C., Basher L., Marden M., Massey C. (2011) Using morphological adjustments to appraise sediment flux. *Journal of Hydrology (New Zealand)*. Vol. 50. No. 1. P. 59–79.
<https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.315172004256339>
- Golosov V.N., Panin A.V. (1998) Space-temporal patterns of river network degradation on the East European Plain. *Trudy Akademii vodokhozyaistvennykh nauk. Vyp. 5. Gidrologiya i ruslovyye protsessy*. P. 163–172 (in Russ).
- Gomez B., Eden D.N., Peacock D.H., Pinkney E.J. (1998) Floodplain construction by recent, rapid vertical accretion: Waipaoa River, New Zealand. *Earth Surf. Processes Landforms*. Vol. 23. P. 405–413.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199805\)23:5<405::AID-ESP854>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199805)23:5<405::AID-ESP854>3.0.CO;2-X)
- Gomez B., Rosser B., Peacock D.H. et al. (2001) Downstream fining in a rapidly aggrading gravel bed river. *Water Resour. Res.* Vol. 37. Iss. 6. P. 1813–1823.
- Grishanin K.V. (1972). Teoriya ruslovogo protsessa (Theory of the channel process). Moscow: Transport (Publ.). 215 p (in Russ).
- Hicks D.M., Shankar U., McKerchar A.I. et al. (2011) Suspended sediment yields from New Zealand rivers. *J. of Hydrology: New Zealand*. Vol. 50. Iss. 1. P. 81–142.
- Makkaveev N.I. (1956) The influence of runoff on longitudinal river profiles. In: *Voprosy geografii. Sbornik statei dlya XVIII Mezhdunarodnogo geograficheskogo kongressa*. Moscow–Leningrad: AN SSSR (Publ.). P. 199–205 (in Russ).
- Makkaveev N.I., Kapitsa A.P., Khmeleva N.V. (1955) Experimental studies of the processes of development of the

¹For citation: Sidorchuk A.Yu. (2025) The formation of river longitudinal profile under the significant influence of slope processes (on the example of the Waipaoa River, New Zealand). *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 56. No. 3. P. 359–371 (in Russ). <https://doi.org/10.31857/S2949178925030014>

- longitudinal profile of a river. *Vestnik MGU. Seriya fiziko-matematicheskikh i estestvennykh nauk.* No. 2. P. 139–151 (in Russ).
- Makkaveev N.I., Khmeleva N.V., Zaitov I.R., Lebedeva N.V. (1961) Eksperimental'naya geomorfologiya (Experimental geomorphology). Moscow: MGU (Publ.). 193 p (in Russ).
- Marden M., Mazengarb C., Palmer A. et al. (2008) Last glacial aggradation and post glacial sediment production from the non-glacial Waipaoa and Waimata catchments, Hikurangi margin, North Island, New Zealand. *Geomorphology.* Vol. 99. Iss. 1–4. P. 404–419.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.12.003>
- Marutani T., Brierley G., Trustrum N., Page M. (Eds.) (2001) Source-to-sink sedimentary cascades in Pacific Rim geo-systems. Matsumoto Sabo Work Office, Japan: Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 184 p.
- NIWA Hydro Web Portal for Hydrometric and Water Quality data [Electronic data]. URL: <https://hydrowebportal.niwa.co.nz> (access date: 05.09.2024).
- Potapov I.I., Snigur K.S. (2019) On the solution of the Exner equation for a bottom with complex morphology. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye.* Vol. 11. No. 3. P. 449–461 (in Russ).
<https://doi.org/10.20537/2076-7633-2019-11-3-449-461>
- Rosser B.J., Jones K.E. (2022) Application of LiDAR differencing to assess sediment load in the upper Waipaoa River, 2005 to 2019. GNS Science Consultancy Report 2021/102 September 2022 [Electronic data]. URL: <https://www.envirolink.govt.nz/assets/Envirolink> (access date: 01.08.2024).
- Samarsky A.A. (1983) Teoriya raznostnykh skhem (Theory of difference schemes). Moscow: Nauka (Publ.). 616 p (in Russ).
- Shamov G.I. (1959) Rechnye nanosy (River sediments). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.). 378 p (in Russ).
- Sidorchuk A. Yu. (2025) Processes of formation of longitudinal profile of the river. *Geomorfologiya i Paleogeografiya.* Vol. 56. No. 2. P. 185–196 (in Russ).
<https://doi.org/10.31857/S2949178925020017>
- Sidorchuk A. Yu., Vinogradova N.N., Krylenko I.V. (2004) Transformation of the longitudinal profile of the Baksan River near the town of Tyrnyauz after the passage of a catastrophic mudflow. In: *Trudy VI konferentsii "Dinamika i termika rek, vodokhranilishch i pribrezhnoi zony morei".* Moscow: IVP RAN (Publ.). P. 461–464 (in Russ).
- Sribny M.F. (1960) Formulas for the average flow velocity of rivers and their hydraulic classification by resistance to movement. In: *Issledovanie i kompleksnoe ispol'zovanie vodnykh resursov.* Moscow: AN SSSR (Publ.). P. 204–220 (in Russ).
- Trimble S.W. (1999) Decreased rates of alluvial sediment storage in the Coon Creek basin, Wisconsin, 1975–93. *Science.* Vol. 285. Iss. 5431. P. 1244–1246.
<https://doi.org/10.1126/science.285.5431.1244>.
- Trustrum N.A., Gomez B., Page H.J. et al. (1999) Sediment production, storage and output: the relative role of large magnitude events in steepland catchments. *Zeitschrift für Geomorphologie (Suppl.).* Vol. 115. P. 71–86.
- Velikanov M.A. (1948) Gidrologiya sushi (Hydrology of land). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.). 530 p (in Russ).
- Velikanov M.A. (1958) Ruslovoi protsess (osnovy teorii) (Channel process (theory basics)). Moscow: Fizmatgiz (Publ.). 395 p (in Russ).
- Vinogradova N.N., Krylenko I.V., Surkov V.V., Tarbeeva A.M. (2010) Glacial rivers of the Elbrus region — conditions of channel formation and the relationship between the morphodynamics of valleys and channels. In: *Eroziya pochv i ruslovye protsessy.* Vol. 17. Moscow: Geogr. f-t MGU (Publ.). P. 96–115 (in Russ).
- Weather and Climate [Electronic data]. URL:
<https://weatherandclimate.com/new-zealand/gisborne-te-karaka> (access date: 05.09.2024).
- Willgoose G.R. (2005) Mathematical modeling of whole landscape evolution. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* Vol. 33. P. 443–459.
<https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122610>