

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕРОЗІЙНО-АКУМУЛЯТИВНИХ ПРОЦЕСІВ ВОДОТОКІВ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

Галина Байрак, Ігор Муха¹

Львівський національний університет імені Івана Франка

Під час вивчення ерозійних процесів використовують різні види досліджень, одними з яких є побудова моделей розвитку процесів. Існує два підходи до моделювання процесів – описові та математичні. Описові моделі відображають якісний аналіз явищ, на противагу цьому математичні моделі дозволяють отримувати кількісну оцінку певних факторів. Класичні математичні моделі – це система алгебричних і диференціальних рівнянь, розв'язком яких є кількісне значення певної величини (функції). Процес розв'язування математичної моделі зручно виконувати за допомогою комп'ютерних середовищ. Комп'ютерне моделювання – це методика, яка побудована на реалізації певної математичної моделі за допомогою сучасних інформаційних технологій. З іншого боку поняття комп'ютерного моделювання виходить за рамки математичного моделювання, так як дозволяє реалізовувати ігрові моделі (наприклад кліткові автомати, нейронні мережі та інші). В даній роботі комп'ютерне моделювання застосоване для вивчення розвитку ерозійних процесів.

Основи теорії руслових процесів і переміщення донних наносів заклали Веліканов М.О. (1949), Франкль Ф.І. (1955), Маккавеев В.М. (1955), Кондратьєв Н.С. (1959), Караушев А.В. (1960), Знаменська Н.С. (1968), Росинський К.І. (1968), Грішанін К.В. (1969) та ін. З позицій методу аналізу ними були запропоновані та обґрунтовані багато моделей для розрахунку руху руслового потоку і зважених наносів. В теорію ерозійних процесів та ерозійно-аккумулятивної діяльності потоків суттєвий вклад внесли В.А. Кіпріанов (1857), І.Ф. Леваківський (1860), В.В. Докучаєв (1877, 1878) і його учні, С.Н. Нікітін (1895), В.І. Масальський (1897), С.С. Соколов (1948), Р.Хортон (1948), розвинули І.Д. Брауде (1965), Ц.Е. Мірцхулава (1970, 1988), Г.І. Швєбс (1974, 1981), Н.А. Ржаніцин (1985) та ін.

Значну увагу питанням моделювання водного стоку дослідники руслових та ерозійних процесів приділяють починаючи з 30-х років ХХ століття. Найбільше поширення набули методи фізичного (т.зв. «вільного») та математичного моделювання. Фізичне моделювання передбачало постановку моделей у природних і лабораторних умовах. Виконували дослідження розвитку ерозії від початкових схилових форм до кінцевого профілю рівноваги рік.

Перші дослідження з математичного моделювання процесів водної ерозії відомі з кінця 30-х – поч. 40-х років минулого століття (Я.В.Корнев (1937), І.Г.Ніл (1938), В.О. Козаков (1940), О.У.Цинг (1940). У 50-70х роках були

¹ Факультет прикладної математики.

запропоновані та обґрунтовані математичні моделі для гірських і рівнинних річкових потоків, розроблені скінченно-різницеві і скінченно-елементні схеми, які дозволяють досліджувати рух рік в одно-, дво- і трьохвимірних обстановках [6]. Математичне моделювання руслового процесу і твердого стоку знаходимо в роботах Васильєва О.Ф., Марчука Г.І., Воєводіна А.Ф., Кавахари М., Мацумото Й., Петрова П.Г., Знаменської Н.С. (1992) та ін.

Моделювання ерозійної діяльності тимчасових потоків найбільше розвинулося у 70-80-х роках ХХ ст. (Експериментальна геоморфологія, 1973; Мірцхулава Ц.Є., 1970, 1988; Московкін В.М., 1980). В основу моделювання покладено принцип аналізу змін параметрів природного водозбору, які чинять безпосередній вплив на розвиток яру. Питання фізичного та математичного моделювання ерозії тимчасових потоків порушені в роботах Є.Ф. Зоріної (1979, 1981), В.Т. Трофімова (1983), В.М. Івоніна (1987) [4].

Математичні моделі розвитку ярів у кінці 90-х років запропоновані А.Ю. Сидорчуком (1998). Просторове моделювання умов зливого змиву і розвитку початкових ерозійних форм виконує О.О. Світличний (1999, 2003, 2010) та його учні [7]. Моделювання водозбірної організації флювіального рельєфу із застосуванням ГІС реалізує Костріков С.В. (2002, 2006), який своїми дослідженнями підтверджує вплив геоморфологічного компонента середовища на функціонування всієї системи водозбору [5].

В результаті багаторічних досліджень встановлені фактори розвитку ерозії, гідравлічні характеристики потоків, механізми ерозійно-аккумулятивного процесу, закономірності розвитку ерозії та руслових процесів в різних природних поясах Землі [8].

Проте вивченню власне переходів ерозійної діяльності потоку на аккумулятивну і, навпаки, змін від аккумуляції матеріалу до транспортування та ерозії, вивчений ще недостатньо. Тому завданням даної роботи було проаналізувати і вибрати найбільш суттєві фактори розвитку ерозійно-аккумулятивних процесів, відобразити їхній характер на різній формі поздовжніх профілях долин рік за допомогою комп'ютерних засобів.

Ерозійний процес починається там, де крутість поверхні більша 1° . Під час інтенсивних дощів чи сніготанення відбувається зливовий стік зі схилів водозборів. Струмені води, стікаючи з поверхні, мають невелику швидкість. Далі вони потрапляють у русла початкових ерозійних форм і їхня швидкість значно зростає. Стікаюча вода набуває кінетичної енергії і у формі турбулентного потоку рухається вниз по схилу. Під час руху збільшується водність (витрата води) і глибина русла. Енергія потоку піднімає з дна частинки ґрунту чи породи, за рахунок чого збільшується його мутність. Наявність твердих частинок у воді зумовлює те, що жива сила потоку витрачається на їх перенесення. Зменшення кількості речовин спричинює перенаправлення енергії потоку на ерозію (розмив) русла [1,2]. В монографії М. Баришнікова наведено критерій початку ерозійного процесу [3]. Згідно з ним для потреб практики суттєвими є два значення швидкостей. Перше, яке називають замулюючим або незсувним, відповідає умові, коли частинки ґрунту з наносів на дні підготовлені до зриву, однак зрив ще не відбувається. При такій швидкості найбільше

пульсаційне значення підйомної сили не перевищує ваги зерна у воді. Друге значення, яке називають розмиваючою або зривною швидкістю, характеризує межу швидкості, вище якої починається інтенсивний розмив русла. При такій швидкості середній рівень пульсаційних підйомних сил дорівнює вазі зерна у воді. Для незсувної середньої швидкості та неоднорідних ґрунтів В.Н. Гончаров отримав формулу

$$v_n = l_g \frac{8,8k}{k_s} \sqrt{\frac{2g(\rho_1 - \rho)k}{3,5\alpha\rho}},$$

а для зриваючої швидкості

$$v_c = l_g \frac{8,8k}{k_s} \sqrt{\frac{2g(\rho_1 - \rho)k}{1,75\alpha\rho}}.$$

Припустимо, що по горизонтальній ділянці вода рухається зі швидкістю v і утворює шар товщиною h_0 . Потік води (витрата води, віднесена до одиниці довжини) обчислюється за формулою $Q = v \cdot h_0$. На похилій поверхні товщина шару h може визначена за формулою (рис. 1)

$$h = h_0 \cos \alpha$$

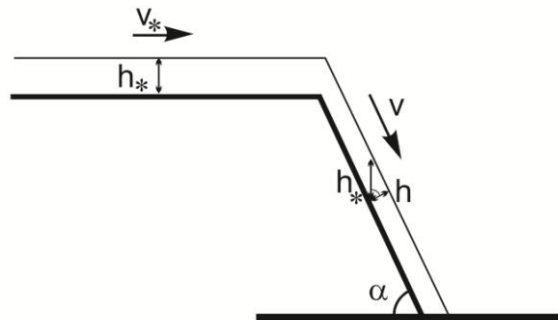


Рис. 1. Швидкість рідини на похилій площині.

Вважають, що потік води Q є величина стала, а отже $Q = v h$, де v – середня швидкість води на похилій поверхні. Звідси отримуємо

$$v = \frac{v_*}{\cos \alpha}$$

Згідно з працею [3], в турбулентному потоці, що рухається з середньою швидкістю v , відрив частинок починається, коли ця швидкість досягає значення v_c . Величина ерозії є пропорційна $v^2 - v_c^2$. Коли на іншій поверхні 2

швидкість v_2 зменшується, то при поверненні до v_c ерозія припиняється, однак відірвані частинки рухаються у воді доти, поки швидкість течії не спаде до величини $v_n = v_c / \sqrt{2}$. Після цього починається акумуляція, величина якої

пропорційна $\frac{v_c^2}{2} - v_2^2$. Описана модель є дуже наближеною, однак в цілому схоплює якісну картину ерозії – акумуляції.

Механізм ерозійної та акумулятивної діяльності потоку неоднаковий на різних сегментах його поздовжнього профілю. На інтенсивність ерозії у руслі впливають швидкість течії, шар стоку, крутість схилів, характер підстеляючих порід. У залежності від чергування пологих і крутих сегментів схилу та відповідно, пухких і міцних порід, що прорізає потік, від витоків до гирла він виробляє характерний поздовжній профіль. На одних ділянках, де незначна крутість схилів, профіль дна потоку має пологий ввігнутий характер. На цих ділянках відповідно зменшується швидкість води, знижується ерозійна і зростає акумулятивна діяльність потоку. На інших ділянках, де збільшується крутість схилів, профіль дна потоку має різкий ввігнутий або випуклий характер. Тут зростає його швидкість й ерозійна діяльність значно переважає акумулятивну. Власне на поздовжньому профілі дна потоків відображаються особливості його ерозійно-акумулятивної діяльності від витоків до гирла.

Описана модель явища ерозії–акумуляції потоку реалізована нами на алгоритмічній мові C++ в середовищі MSVisualStudio 2012 Express з використанням відкритої графічної бібліотеки OpenGL. Вхідними даними для програми є кількість пологих схилів та їх геометрія, середня швидкість потоку на горизонтальній ділянці v , та значення критичної швидкості v_c . Результати досліджень відображаються у вигляді змін поздовжнього профілю дна ерозійних форм та малих рік в інтерактивному режимі на екрані монітора. Затінені ділянки визначають розмиви, заточковані – акумулятивні зони.

Ми проаналізували поздовжні профілі долин рік різних порядків Українських Карпат, а також деяких тимчасових водотоків. За основу була прийнята цифрова модель рельєфу за даними SRTM (наближено її масштаб відповідає 1:75 000). Шляхом оцифрування тальвегів долин у програмі ArcGIS, були візуалізовані поздовжні профілі днищ долин таких рік, як Опір, Сукіль, Мізунка, Свіча, Лімниця, Бистриця-Надвірнянська, Прут на північно-східному макросхилі Карпат, а також р. Латориця, Боржава, Ріка, Тересва, Тиса на південно-західному макросхилі (рис. 2).

Складені профілі відображають особливості ерозійно-акумулятивної діяльності карпатських рік від початкових руслових заглиблень до місць їхнього впадіння у ріку вищого порядку. Можна простежити таку закономірність, що профілі в цілому мають ввігнутий характер. На верхніх ділянках профілю кут α близький до прямого. В цих частинах долин переважають тимчасові водотоки, характерні значні перевищення рельєфу, крутість поверхні і швидкість стікання води. Верхні сегменти закінчуються різким вгином, що відповідає місцям злиття тимчасових водотоків і водотоків першого-другого порядку. Далі лінії графіків мають плавний характер. У

багатьох рік він слабо ввігнутий і відповідає середній течії рік. На нижніх ділянках профілю лінія дуже плавна, а в деяких ріках (Бистриця-Надвірнянська, Прут, Боржава, Тересва, Тиса) близька до горизонтальної, що говорить про досягнення ними деякого базису ерозії.

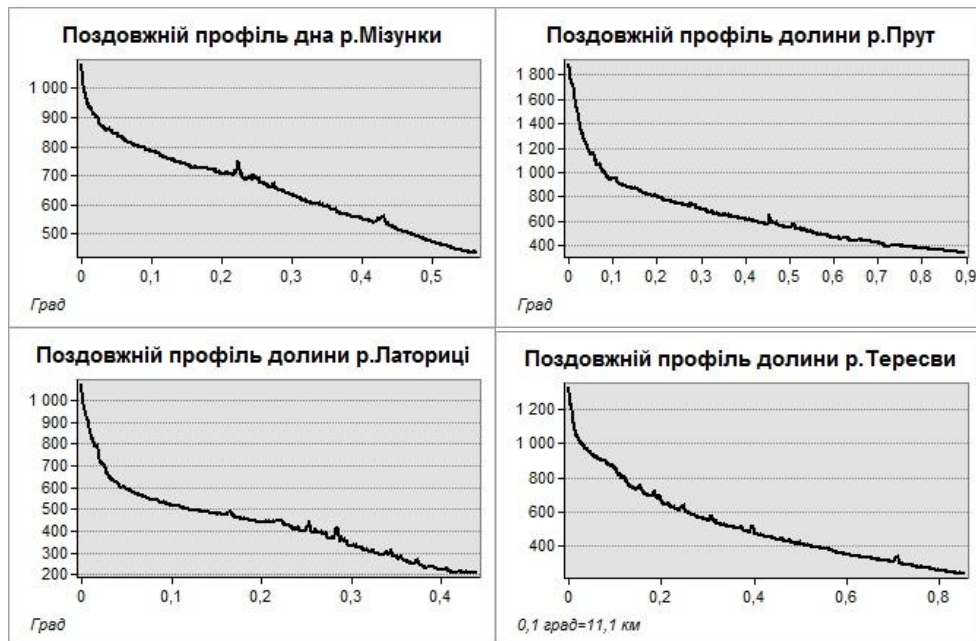


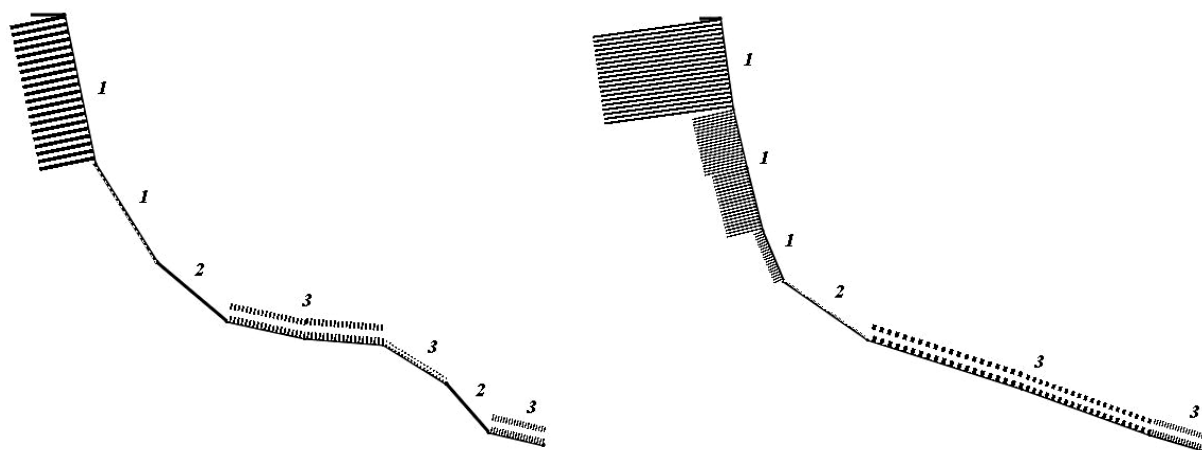
Рис. 2. Поздовжні профілі окремих долин рік Українських Карпат, виконані в програмі ArcGIS (екстремуми на графіку – неточності в оцифруванні тальвегів долин).

Випуклі у нижній частині ділянки профілю характерні для небагатьох рік, як, наприклад, для р. Латориці в місці перетину нею Полонинського хребта, а також для малих рік і тимчасових водотоків, які перетинають окремі хребти чи їхні відроги. Випуклий профіль мають малі долини, що прорізають шари міцних порід.

За допомогою розробленого програмного забезпечення проведено серію числових експериментів з різними видами профілів рік. Були отримані якісні картини характеру проходження ерозійних й акумулятивних процесів на різних сегментах профілів (рис. 3). Враховані параметри крутості схилів і швидкості стікання по них води. На верхніх стрімких ділянках графіків переважають головно явища ерозії. Товщина шару (I) показує інтенсивність ерозійного процесу. Вона тим більша, чим більша крутість схилів, оскільки швидкість та енергія потоку направлена на розмив як міцних, так і податливих порід. На найбільш ввігнутих частинах профілів поширене транспортування твердого матеріалу. Далі від середньої частини до низів'їв для ввігнутих ділянок профілів переважає акумуляція наносів на всьому проміжку, а на випуклих відбувається тимчасова акумуляція матеріалу, потім перенесення і значна акумуляція у низів'ях.

Шляхом комп'ютерного програмного моделювання можна змінювати крутість схилів, швидкість руху води і таким чином отримувати відображення

проявів ерозійно-аккумулятивної діяльності на поздовжньому профілі ріки, а також в окремих пунктах, які відповідають координатам точки на місцевості.



a

б

Рис. 3. Найбільш характерні поздовжні профілі долин рік Українських Карпат та прояви ерозійно-аккумулятивної діяльності на них за результатами реалізації комп'ютерного моделювання: *a* – р. Латориці, *б* – р. Прут. Умовні позначення: процеси 1 – ерозії, 2 – транспортування, 3 – аккумуляції наносів.

Таким чином, виконане дослідження на основі комп'ютерних моделей особливостей ерозійних та аккумулятивних процесів водотоків Українських Карпат підтвердило ті явища, що найбільш активно є ерозійна діяльність тимчасових потоків і малих рік з крутим поздовжнім падінням долин. На цих елементах річкової мережі домінує виніс матеріалу на всьому проміжку поздовжнього профілю. У долинах середніх і великих рік із ввігнутих профілем відбувається аккумуляція матеріалу з вищележачих ділянок рівномірно по всій довжині профілю. У долинах із ввігнуто-випуклим профілем на верхніх ділянках йде ерозія, далі незначна аккумуляція, потім перенесення наносів і завершується процес значним відкладанням матеріалу у низів'ях водотоку.

Розроблена модель частково пояснює різну ерозійно-аккумулятивну активність гірських рік і може бути використана для прогнозування їхнього розвитку та створення ефективних заходів на тих ріках, де інтенсивність ерозії та аккумуляції вища.

Список літератури:

1. Байрак Г.Р. Різномасштабні та сучасні дослідження активності руслових процесів на Верхньобескидській ділянці Дністра/ Байрак Г.Р.// Фізична географія та геоморфологія. Вип.66. – К.: ВГЛ «Обрії», 2012. – с. 216-225.
2. Байрак Г.Р. Сучасні руслові процеси і динаміка русла р. Тиси на ділянці перетину Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма/ Байрак Г.Р.// Фізична географія та геоморфологія. Вип.62. – К.: ВГЛ «Обрії», 2011. – с. 45-54.
3. Барышников Н.Б. Русловые процессы. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 439 с.
4. География овражной эрозии. Под ред. Е.Ф. Зориной. – М.: изд-во МГУ, 2006. – 324 с.
5. Костріков С.В. Флювіальні геоморфосистеми: геоінформаційне моделювання водозбірної організації рельєфу. / Автореф. дис... докт. геогр. наук: 11.00.04 / Костріков С.В.; – Інститут географії НАН України. – Київ, 2006.– 40 с.

6. Потапов И.И. Моделирование гидродинамических и русловых процессов равнинных рек /Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Потапов И.И.; Дальневосточный государственный университет путей сообщения – Владивосток, 2006. – 35 с.
7. Светличный А.А. Склоновый эрозионный процесс и принципы математического моделирования, расчета и прогноза водной эрозии почв //Фіз. геогр. та геоморфологія. – К.: ВГЛ «Обрії», 2012. – Вип.2 (66). – с.116-122.
8. Чалов Р.С. Морфодинамика русел равнинных рек. /Чалов Р.С. Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В. – М.: Геос, 1998. – 288 с.

COMPUTER MODELLING OF EROSION AND ACCUMULATION PROCESSES OF RIVERS UKRAINIAN CARPATHIANS

G. Bayrak, I. Mukha

The article presents the results of numerical experiments with different kinds of longitudinal profiles of river valleys of the Ukrainian Carpathians using the software developed. Computer model shows different erosion-accumulative activity of mountain rivers and can be used to predict their development and creation of effective interventions on those rivers, where the intensity of erosion and accumulation above.

Keywords: computer modelling, longitudinal profile, erosion-accumulative activity of rivers.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ВОДОТОКОВ УКРАИНСКИХ КАРПАТ

Г. Байрак, И. Муха

Представлены результаты численных экспериментов с различными видами продольных профилей долин рек Украинских Карпат с использованием разработанного программного обеспечения. Компьютерная модель отображает разную эрозионно-аккумулятивную активность горных рек и может быть использована для прогнозирования их развития и создания эффективных мероприятий на тех реках, где интенсивность эрозии и аккумуляции выше.

Ключевые слова: компьютерная модель, продольный профиль, эрозионно-аккумулятивная деятельность рек.