

Я. И. КАГАНОВ, И. П. КОВАЛЬЧУК

ОЦЕНКА ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА В ВЕРХНЕМ ТЕЧЕНИИ ДНЕСТРА

Предложен метод оценки направленности эрозионно-аккумулятивного процесса в русле верхнего Днестра. Полученная количественная оценка соотношения интенсивности эрозии и аккумуляции наносов позволяет вносить коррективы в систему мероприятий противопаводковой защиты населенных пунктов, угодий и инженерных объектов, расположенных в пределах пойменно-руслового комплекса горно-предгорной части Днестра.

We suggest a method for assessing the trend of the erosion-accumulation process in the channel of the upper Dniester. The resulting numerical estimate of the relationship between erosion intensity and accumulated drift makes it possible to make corrections in the system of flood protection measures for human settlements, lands and engineering facilities within the floodland-channel complex of the mountain-piedmont part of the Dniester.

Увеличение водности рек Карпатского региона Украины, наблюдаемое в последние 8–10 лет, сопровождается активным развитием русловых эрозионно-аккумулятивных процессов в горной и предгорной частях бассейна и аккумулятивно-эрозионных — в пределах Верхнеднепровской равнины. Высокая селитебная, земледельческая, транспортная и рекреационная освоенность этой территории, а также участвовавшие случаи экстремально высоких паводков и половодий вызывают необходимость изучения особенностей проявления здесь эрозионно-аккумулятивного процесса, выявления его направленности и интенсивности, определения участков с различными тенденциями и соотношением эрозии и аккумуляции. Эти данные необходимы для планирования, обоснования и реализации комплекса противопаводочных мероприятий и решения геоэкологических проблем.

Методы исследования включали: полевое обследование состояния русел Днестра и его горных притоков; создание электронной базы данных о гидрологическом режиме реки (ежедневные расходы или уровни воды за более чем 50-летний период); сбор и анализ данных о русловых отложениях и стоке взвешенных наносов; создание серии поперечных профилей пойменно-руслового комплекса Днестра, повторное их нивелирование и определение тенденций изменения морфологии и направленности

развития эрозионно-аккумулятивного процесса [1]; анализ результатов продольного нивелирования русла и дамб его обвалования; создание крупномасштабной динамической модели развития паводка и затопления поймы Днестра [2, 3]; обобщение полученных данных, создание модели развития эрозионно-аккумулятивного процесса в русле Днестра.

Объектом исследования служила верхняя часть Днестра в пределах Карпатского региона Украины (см. рисунок).

Направленность эрозионно-аккумулятивного процесса в значительной степени определяется состоянием активного слоя русловых отложений, устойчивость которого обуславливает уровень переформирования дна и берегов реки. Практическая значимость этой проблемы выражается в необходимости прогноза заносимости судоходного фарватера, оценки



Район исследования
(выделен прямоугольником).

Штриховые линии — границы областей.

устойчивости стокорегулирующих и русловыпрямительных сооружений, выявления эрозионноопасных участков и обоснования их защиты — закрепления оснований дамб и берегов рек.

При оценке руслового процесса выявляется преобладающий способ перемещения донных и взвешенных наносов. На равнинных участках рек, как правило, преобладает перемещение взвешенных наносов. Среди многих подходов к определению его критерия можно выделить соотношение между вертикальной составляющей пульсационной скорости V и гидравлической крупностью наносов ω . При максимальной гидравлической крупности $\omega_m \leq 3V_z$ наносы перемещаются во взвешенной форме, при $\omega_m > 3V_z$ — в донной [4].

Расход взвешенных наносов через поперечное сечение реки ($\text{м}^3/\text{с}$) рассчитывается при помощи уравнения

$$P_s = KQN\eta^2 \frac{V^2}{H} \Gamma, \quad (1)$$

где K — коэффициент, при объемном определении мутности $K=0,000057$; Q — расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; $N=MC/g$ — параметр (M — эмпирический параметр $0,7C+6$, где C — коэффициент Шези); V — средняя скорость потока, $\text{м}/\text{с}$; H — средняя глубина потока, м ; η — переходной множитель от донной к средней скорости потока; Γ — гидромеханический параметр наносов.

$$\eta^2 = \frac{0,53C-4,1}{C-2}, \quad (2)$$

$$\Gamma = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_{\text{взм},i}}{100} B_i \Phi_i, \quad (3)$$

где α — процентное содержание i -й фракции в составе наносов, образующих мутность взмыва; B_i — функция, зависящая от коэффициента Шези C и безразмерного параметра $L_i = \frac{\omega_i}{V}$; ω_i — гидравлическая крупность i -й фракции наносов; Φ_i — функция безразмерной величины $E_i = \frac{\omega_i}{V_{z \max}}$; $\omega_{z \max} = 3V_z$ — максимальное значение вертикальной составляющей пульсационной скорости.

А. В. Караушев [4] средние абсолютные значения пульсационной скорости у дна приравнивает к среднему ее значению по вертикали по формуле

$$V_z = \frac{V}{\sqrt{N}} = \frac{V\sqrt{g}}{\sqrt{MC}}. \quad (4)$$

Среди других предложений можно отметить рекомендацию К. В. Гришанина [5], который средние значения вертикальной пульсационной скорости ($\text{м}/\text{с}$) принимает равными динамической скорости V_* :

$$V_z \approx V_* = \sqrt{gHJ}, \quad (5)$$

где g — ускорение земного притяжения; J — уклон водной поверхности; H — глубина потока.

Гидравлическую крупность наносов ω_r ($\text{см}/\text{с}$) можно определить по формуле

$$\omega_r = K_T \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \cdot d}, \quad (6)$$

где γ_s и γ — объемный вес наносов и воды; d — средний размер частиц, см ; K_T — коэффициент, составляющий 33,1.

Расчет гидротермического параметра Γ по формуле (3) выполняется при известном гранулометрическом составе русловых отложений и гидравлических крупностях ω_i , соответствующих диаметрам фракций d_i и процентному содержанию их в пробе α_i .

При гидравлической крупности максимальной частицы $\omega_m > V_{z \max} = 3V_z$ определяются размер наибольшей частицы во взвешенных наносах d_n ($\omega_n = V_{z \max}$), процент ее содержания в массе взвешенных наносов α_n , максимальная гидравлическая крупность ω_n и процентное содержание взмученных частиц $\alpha_{\text{взм},i}$:

$$\alpha_{\text{взм},i} = \alpha_i \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{100}. \quad (7)$$

Средние взвешенные крупности взвешенных и влекомых наносов $d_{\text{в}}$ и $d_{\text{д}}$ определяются по соотношениям

$$d_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i d_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (8) \quad \text{и} \quad d_{\text{д}} = \frac{\sum_{i=n+1}^m \alpha_i d_i}{\sum_{i=n+1}^m \alpha_i}. \quad (9)$$

При гидравлической крупности максимальной частицы $\omega_m \leq V_{z \max}$ весь состав русловых отложений перемещается в форме взвешенных наносов ($n = m; \alpha_{\text{взм}, i} = \alpha_i$).

Гидравлический параметр Γ и расход взвешенных наносов P_s рассчитываются при следующих данных: расходе воды Q , площади живого сечения ω , ширине реки B , уклоне водной поверхности J и гранулометрическом составе русловых отложений d_i .

Приведены основные гидравлические параметры и характеристики наносного режима Днестра на участке между створами 205 и 130 (табл. 1) при условии, что на участке между створами 205 и 155 гранулометрический состав русловых отложений одинаков. Анализ расхода взвешенных наносов P_s , рассчитанных по формуле (1) и зависящих от многих гидравлических и морфометрических параметров, позволяет выявить его достаточно тесную корреляционную зависимость от средней скорости потока V . Последняя в силу морфометрических особенностей поперечного сечения в различных створах

Таблица 1

Характеристика наносного режима Днестра

Номер створа	Гранулометрический состав русловых отложений		Q , м ³ /с	J	V , м/с	H , м	P_s , м ³ /с	d_v , м
	d_i , см	P_i , %						
205	0,00075	2,4	1132	0,00178	0,984	0,92	0,209	0,0024
	0,0030	8,8						
	0,0075	9,3	600	0,00178	1,154	1,156	0,155	0,0024
	0,015	7,0						
	0,035	3,0	435	0,00178	1,45	2,00	0,139	0,0057
	0,075	4,4						
197	0,15	7,8						
	0,35	6,2	1154	0,000742	0,55	1,2	0,013	0,0023
	0,75	14,6						
	1,5	23,3	613	0,000742	1,06	0,33	0,178	0,00018
193	3,5	11,0						
	7,5	2,2	442	0,000742	1,53	0,69	0,387	0,00042
			1157	0,000804	0,70	1,08	0,054	0,00081
			614	0,000804	0,77	1,78	0,024	0,00081
187			444	0,000804	0,85	1,24	0,037	0,00081
			1160	0,000771	0,33	0,97	0,0025	0,00081
			616	0,000771	1,76	2,92	0,273	0,00042
182			445	0,000771	1,62	2,75	0,158	0,0024
			1181	0,000599	1,92	3,20	0,621	0,0024
			627	0,000599	1,43	2,38	0,155	0,00081
176			453	0,000599	1,37	1,78	0,123	0,00081
			1459	0,000244	1,39	4,36	0,192	0,0024
			775	0,000244	1,11	2,42	0,058	0,00042
172			626	0,000244	1,80	1,48	—	0,00042
			1473	0,000363	0,65	3,18	0,017	0,00081
			782	0,000363	0,65	1,69	0,016	0,00042
155			632	0,000363	0,69	1,98	0,014	0,00081
			1533	0,000452	2,51	3,14	0,955	0,00081
			814	0,000452	2,04	2,11	0,8	0,0057
149			657	0,000452	1,77	5,46	0,153	0,0023
	0,003	50,5	2183	0,000513	1,90	4,92	2,385	0,0001
	0,0075	12,6						
	0,015	29,5	1252	0,000513	1,65	3,28	1,208	0,0001
136	0,035	5,7						
	0,075	1,5	932	0,000513	1,60	2,55	1,001	0,0001
			2313	0,000251	2,72	6,25	6,062	0,0001
			1326	0,000251	2,21	4,41	1,988	0,0001
130			992	0,000251	1,964	3,74	1,191	0,0001
			2474	0,000354	1,73	4,61	1,811	0,0001
			1419	0,000354	1,378	3,32	0,701	0,0001
		1061	0,000354	1,178	3,05	0,326	0,0001	

по-разному изменяется с глубиной и расходом воды Q , что связано со степенью поёмности реки. Следует также учитывать, что русло в большинстве створов рассматриваемого участка Днестра обваловано, т. е. его поёмность отличается от таковой естественного русла.

Если уровень возможных русловых переформирований равнинных участков реки свести к изменчивости поперечного сечения ее продольного профиля, то в качестве критерия устойчивости русла можно принять величину касательного напряжения

$$\tau = \gamma HJ = \rho V_*^2, \quad (10)$$

где ρ — плотность воды; V_* — динамическая скорость, или скорость касательного напряжения.

Для равнинных участков рек, русло которых сложено мелкозернистыми легкоразмываемыми грунтами, предельно допустимую величину касательного напряжения τ_0 можно определить при условии, что вертикальная составляющая пульсационной скорости V_z равна гидравлической крупности ω_r , рассчитываемой по формуле (6). Величина V_z по рекомендации К. В. Гришанина [5] может быть принята равной динамической скорости V_* , т. е.

$$\tau_0 = \rho \omega_r, \quad (11)$$

где ω_r — гидравлическая крупность.

Соотношение величин τ и τ_0 определяет направленность эрозионно-аккумулятивного процесса в пространственно-временном измерении и параметр δ_r , характеризующий степень недеформированности дна реки, можно представить уравнением

$$\delta_r = \frac{\tau_0}{\tau} = \frac{\omega_r^2}{V_*^2} = 1,89 \frac{d_b}{HJ}, \quad (12)$$

где d_b — средневзвешенная крупность взвешенных наносов.

Направленность эрозионно-аккумулятивного процесса в расчетном створе реки можно охарактеризовать параметром

$$\delta_T = \delta_r - 1. \quad (13)$$

Условию транзитного перемещения наносов соответствует величина $\delta_T = 0$, при $\delta_T < 0$ происходит процесс размыва (Э), при $\delta_T > 0$ — аккумуляция наносов (А).

Эрозионно-аккумулятивный процесс на расчетном участке реки можно оценить по методике [6], основанной на предельных значениях параметров направленности δ_T и интенсивности руслового процесса $\phi_T = \frac{\delta_T''}{\delta_T'}$, где δ_T' и δ_T'' — соответственно их значения в верхнем и нижнем створах, ограничивающих рассматриваемый участок реки.

Анализ типов ЭАП на обвалованных участках Днестра (табл. 2) при расходах воды 1, 5 и 10 % обеспеченности свидетельствует об абсолютном преобладании аккумулятивной направленности наносного режима при 1 %-ном расходе на верхнем участке между створами 205 и 155. При этом на отдельных участках чередуются процессы затухания и роста аккумуляции. Поэтому между створами 193 и 182, 176 и 172 следует предусмотреть мероприятия по наращиванию гребней дамб обвалования. На участке между створами 155 и 130, где преобладает эрозионная направленность руслового процесса, необходимы мероприятия по креплению основания дамб обвалования.

Таблица 2

Типы эрозионно-аккумулятивных процессов на обвалованных участках Днестра

Участок	При расходе обеспеченности								
	1 %			5 %			10 %		
	δ_T'	ϕ_T	Тип ЭАП	δ_T'	ϕ_T	Тип ЭАП	δ_T'	ϕ_T	Тип ЭАП
205–197	1,72	0,63	A↓	1,16	0,36	A↓	2,06	0,27	A↓
197–193	1,08	0,70	A↓	0,42	0,017	A↓	0,56	1,02	A↑
193–187	0,76	1,33	A↑	0,007	–92,9	A → Э	0,57	1,84	A↑
187–182	1,01	1,26	A↑	–0,65	–0,12	Э → A	1,05	0,42	A↓
182–176	1,27	0,55	A↓	0,079	15,19	A↑	0,44	2,77	A↑
176–172	0,7	1,4	A↑	0,12	2,5	A↑	1,22	0,93	A↓
172–155	0,98	0,36	A↓	0,30	6,33	A↑	1,14	0,65	A↓
155–149	0,35	–2,65	A → Э	1,90	–4,68	A → Э	0,74	–1,16	A → Э
149–136	–0,93	1,01	Э↓	–0,89	0,93	Э↑	–0,86	0,93	Э↑
136–130	–0,94	0,89	Э↑	–0,83	1,01	Э↓	–0,80	1,02	Э↓

При меньших расходах воды (5 и 10 % обеспеченности) затухающая аккумуляция сменяется прогрессирующей (участки 197–193, 182–176) и наоборот. На отдельных участках наблюдается усиление эрозии при меньших расходах воды, что объясняется уменьшением влияния поймы или ее отсутствием.

Таким образом, полученная информация (см. табл. 2) позволяет количественно и качественно оценить направленность руслового процесса по длине реки при расходах соответствующей обеспеченности и на каждом расчетном участке при разных расходах воды. В результате установлено, что на обвалованном участке Днестра с мелкозернистыми грунтами преобладает транспорт взвешенных наносов. Верхний участок реки, русло которого сформировано в гравийно-галечниковых отложениях, характеризуется крайне неравномерным во времени гидрологическим режимом с преобладанием транспорта влекомых наносов.

Степень недеформированности русла горной реки, выполненного крупными разнозернистыми отложениями, можно оценить параметром δ_k :

$$\delta_k = \frac{0,79(\gamma')^{1/4} \left(\frac{1+b_1}{b_1} \right)^{\frac{m-2}{4m}}}{(m+1)^{1/2} \cdot \left(\frac{H}{d_{cp}} \right)^{\frac{m-2}{4m}} \cdot I^{1/4}}, \quad (14)$$

где $\gamma' = \frac{\gamma_n - \gamma}{\gamma}$; γ_n — плотность наносов; γ — плотность воды; g — ускорение силы тяжести; H — средняя глубина; d_{cp} — средняя крупность русловых отложений; m — показатель степени в степенной формуле распределения скорости по вертикали; I — гидравлический уклон; b_1 — показатель степени

в уравнении гранулометрической кривой; $p = \alpha_1 \left(\frac{d}{d_{cp}} \right)^{b_1}$.

При $\delta_k = 1$ русло относительно устойчивое, аккумуляция наносов характеризуется соотношением $\delta_k > 1$, а эрозия — $\delta_k < 1$.

Для удобства оценки направленности руслового процесса параметр устойчивости русла можно представить величиной

$$\delta_y = \delta_k - 1. \quad (15)$$

Интенсивность руслового процесса, характеризующая степень изменения русловых переформирований, рассматривается в направлении движения водного потока от верхнего створа к нижнему.

Выделяются следующие типы интенсивности руслового процесса: увеличение соответствующего вида деформаций; уменьшение соответствующего вида деформаций; тенденции к изменению соответствующего вида деформаций в верхнем створе на противоположный в пределах расчетного участка: а) с преобладанием этого вида в верхнем створе, б) с его преобладанием в нижнем створе.

Интенсивность руслового процесса определяет характер русловых переформирований на участке реки между расчетными створами: нижнем по течению (δ_y'') и верхнем по течению (δ_y').

Результат руслового переформирования на участке характеризуется приращением параметра устойчивости:

$$\Delta\delta_y = \delta_y'' - \delta_y'. \quad (16)$$

Степень относительного переформирования характеризует коэффициент интенсивности

$$\phi_1 = \frac{\delta_y''}{\delta_y'}. \quad (17)$$

Параметр $\Delta\delta_y$ может быть выражен формулой

$$\Delta\delta_y = \delta_y'(\phi_1 - 1). \quad (18)$$

Определение типа эрозионно-аккумулятивного процесса, характера русловых переформирований и их количественных показателей включает совместное рассмотрение параметров направленности интенсивности руслового процесса и может быть выполнено с помощью классификации русел горных рек по их устойчивости [6–8]. При этом может возникнуть необходимость предусмотреть соответствующие регулировочные мероприятия при расчетном расходе воды — максимальном паводковом или руслоформирующем. Расчет параметров устойчивости выполнялся при расходах воды 1, 5 и 10 % обеспеченности (табл. 3) в створах Днестра от с. Стрелки вниз по течению (от ПК 1334 + 010 до ПК 1310 + 460).

В соответствии с классификацией русел горных рек по устойчивости при расходах воды 1, 5 и 10 % обеспеченности выделены типы ЭАП (табл. 4). Установлено, что между створами ПП 239 и ПП 230 при расходах воды 1 % обеспеченности прогрессирует процесс аккумуляции наносов. При этом повышаются отметки дна реки, и здесь целесообразно строительство оградительных дамб. На

Таблица 3

Расчет параметров устойчивости русел

Створ	ПК	Q	ω	B	J	d_{cp}	d_{max}	V	H	δ_k	δ_y
ПП 239	1334 + 0,10	840	490	225	0,00207	0,071	0,110	1,71	2,18	1,28	0,28
		340	300	95	0,00207	0,071	0,110	1,13	3,16	1,64	0,64
		282	260	95	0,00207	0,071	0,110	1,08	2,73	1,64	0,64
ПП 230	1323 + 560	946	670	565	0,00339	0,071	0,110	1,41	1,18	1,30	0,30
		411	495	405	0,00339	0,071	0,110	0,83	1,22	1,61	0,61
		300	150	160	0,00339	0,071	0,110	2	0,93	1,09	0,09
С 24	1319 + 810	946	220	152	0,00328	0,071	0,110	4,3	1,44	0,79	-0,21
		442	145	102	0,00328	0,071	0,110	3,05	1,42	0,93	-0,07
		326	125	82	0,00328	0,071	0,110	2,61	1,52	1,01	0,01
С 17	1316 + 335	946	315	130	0,00469	0,071	0,110	3	2,42	0,98	-0,02
		482	270	123	0,00469	0,071	0,110	1,78	2,19	1,24	0,24
		326	115	105	0,00469	0,071	0,110	2,83	1,09	0,94	-0,06
С 5	1310 + 460	946	185	100	0,00359	0,071	0,110	5,11	1,85	0,73	-0,27
		482	147	90	0,00359	0,071	0,110	3,27	1,63	0,91	-0,09
		326	115	76	0,00359	0,071	0,110	2,83	1,51	0,97	-0,03

этом участке при расходах воды 5 и 10 % обеспеченности русло относительно устойчиво. Участок Днестра от ПП 230 до С 24 — верхний по течению, его целесообразно обваловать, участок от С 24 до С 17 — в его нижней части, а на участке С 17—С 5 целесообразно выполнить берегоукрепительные работы.

Таким образом, предлагаемые методы расчета направленности и интенсивности руслового эрозионно-аккумулятивного процесса в условиях эксплуатации обвалованного русла и прилегающей к нему поймы с учетом их конкретного состояния позволяют предусмотреть соответствующие мероприятия по укреплению оснований дамб, наращиванию их высоты, по защите берегов от размыва, по предупреждению затопления и подтопления населенных пунктов и сельскохозяйственных угодий,

Таблица 4

Типы эрозионно-аккумулятивного процесса

Створ	Обеспеченность расхода воды, %	Q , м ³ /с	δ_y	δ'_y	ϕ_1	Индекс типа ЭАП	Направленность русловых переформирований
ПП 239	1	840	0,28	+0,28	+1,07	1,1	A↑
ПП 230	1	946	0,30	+0,30	-0,70	5,2	A → Э
С 24	1	946	-0,21	-0,21	+0,095	3,2	Э↑
С 17	1	946	-0,02	-0,02	+13,50	1,2	Э↓
С 5	1	946	-0,27				
ПП 239	5	340	0,64	+0,64	+0,95	3,1	A↓
ПП 230	5	411	0,61	+0,61	-0,11	5,2	A → Э
С 24	5	442	-0,07	-0,07	-3,43	7,1	Э → A
С 17	5	482	0,24	+0,24	-0,38	5,2	A → Э
С 5	5	482	-0,09				
ПП 239	10	282	0,064	+0,64	+0,14	3,1	A↓
ПП 230	10	300	0,09	+0,09	+0,11	3,1	A↓
С 24	10	326	0,01	+0,01	-0,60	7,2	A → Э
С 17	10	326	-0,06	-0,06	+0,50	3,2	Э↑
С 5	10	326	-0,03				

размещенных в долине реки, разрушения дорог, трубопроводов, ЛЭП, мостов и других хозяйственных объектов, а также проверить пропускную способность междумбового пространства. Полученные данные об интенсивности и направленности эрозионно-аккумулятивного процесса в русле Днестра выступают в качестве информационной базы при разработке системы противопаводковых мероприятий и решении других геоэкологических проблем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ковальчук І.** Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз. — Львів, 1997.
2. **Ковальчук І.** Гідролого-геоморфологічні процеси в Карпатському регіоні України // Праці НТШ. — Львів: НТШ, 2003. — Т. 12, № 3.
3. **Kovalchuk I., Mykhnovych A.** Analysis of erosion-accumulation processes trends changes in the Dnister catchment // Sediment transfer through the fluvial system. — М., 2004.
4. **Караушев А В.** Речная гидравлика. — Л: Гидрометеиздат, 1969.
5. **Гришанин К. В.** Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1979.
6. **Каганов Я. И.** Размещение ограждающих сооружений на горных реках в стадии изысканий и проектирования // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. — Львов: Вища шк., 1990. — Вып. 52.
7. **Каганов Я. И.** Прогнозирование русловых деформаций горных рек // Гидротехническое строительство. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — № 11.
8. **Каганов Я. И.** Русловые переформирования при регулировании рек горно-предгорной зоны. — Львов: Вища шк.; Изд-во Львов. ун-та, 1981.

*Львовский национальный университет Ивана Франко,
Одесский национальный морской университет, Украина*

*Поступила в редакцию
9 августа 2005 г.*