

Куценко М.В.

УПРАВЛІННЯ ЕРОЗІЙНО-АКУМУЛЯТИВНИМИ ПРОЦЕСАМИ У ДЕЛЬТАХ РІЧОК

Розглянуто механізм саморегулювання ерозійно-аккумулятивних процесів у річкових дельтах. Запропонована математична модель динамічно врівноваженої дельти. Розроблено алгоритм та наведені результати рішення задачі перерозподілу витрат води й наносів із метою стабілізації рукавів дельти р. Терек.

Локальні руслові процеси, які пов'язані з гідродинамічними особливостями взаємодії водних потоків із річищами, проявляються на фоні загальних тенденцій до ерозії чи акумуляції у межах певних термінів часу. Ці тенденції контролюються співвідношеннями характеристик потоку та річища, що забезпечують загальне прагнення до врівноваженого балансу наносів [3]. Врівноважений режим є бажаним для господарської діяльності та екологічно сприятливого стану водних біогеоценозів. Але такий режим є характерним тільки для середніх частин флювіальних систем, в той час як на верхніх ділянках долин переважає ерозія, а біля гирла – акумуляція. Дельта річки не може бути стійкою у природних умовах, тому що існує позитивний зворотний зв'язок процесу акумуляції з морфологією створюваного ним флювіального рельєфу.

Особливості функціонування дельтових геосистем

Як показали М.І.Маккавєєв і Р.С.Чалов [2] просторова стійкість деревоподібної структури флювіальної мережі пояснюється ступеневою залежністю транспортуючої спроможності потоку від витрат води. Якщо показник ступеню при витратах більше одиниці, що характерно для річок, то при інших рівних умовах потік має більшу транспортуючу спроможність ніж сума транспортуючих спроможностей його притоків. Недонавантаження потоку наносами веде до ерозії і просторової стабілізації його річища. Така ж залежність є причиною просторової нестійкості дельт. Розтікання річища на рукави є наслідком і, одночасно, важливою причиною акумуляції, тому що веде до зменшення сумарної транспортуючої спроможності потоків. При цьому загальна тенденція перебування морфології геосистеми для забезпечення її динамічної рівноваги зберігається, але до кінця такий стан не досягається.

Аналіз ерозійно-аккумулятивних процесів показав, що в дельті спостерігається 2 головні тенденції - прогресивна й регресивна акумуляція. Перша обумовлена втратою енергії при впадінні річки у водоймище, а друга пов'язана із зменшенням ухилів у середній і верхній частинах аккумулятивних форм рельєфу. Співвідношення між обома видами акумуляції підтримується у певному режимі шляхом саморегулювання ухилів річища. Чим інтенсивніше відбувається прогресивна акумуляція – тим швидше зменшується ухил пригирлової частини річища, що стимулює регресивну і зменшує прогресивну акумуляцію. Регресивна акумуляція веде до збільшення ухилу в нижній та його зменшенню у верхній частині створюваної аккумулятивної форми рельєфу. Це обмежує накопичення наносів і сприяє їх транспортуванню вниз за течією, тобто - збільшує інтенсивність прогресивної акумуляції. Унаслідок взаємодії річки із флювіальним рельєфом відбувається просторово-часова диференціація ерозійно-аккумулятивних процесів, яка прагне забезпечити врівноважений баланс. В умовах переважної акумуляції наноси витискають потоки з річищ, які підвищуються над прилеглою місцевістю. Перш ніж ухили річищ набувають такого узгодження з характеристиками потоків, яке забезпечує врівноважений баланс, відбувається ускладнення структури дельти. Тому й виникає проблема цілеспрямованого управління ерозійно-аккумулятивними процесами для підтримки врівноваженого стану річкових дельт. До посилення акумуляції веде, з одного боку, ділення річища на рукави, з іншого – збільшення їх довжини за рахунок прогресивної акумуляції. У першому випадку діє нелінійний зв'язок транспортуючої спроможності потоку з витратами води, у другому – зменшення ухилу річища біля гирла. Для стабілізації просторового положення рукавів дельти, необхідно проводити роботи по їх обвалуванню. При цьому треба задавати річищу такий ухил, який забезпечить врівноважений баланс наносів. Заглиблення дна річища в межах дельти не принесе користі, оскільки буде стимулювати подальшу акумуляцію. Для оптимізації таких робіт нами розроблена балансова модель динамічної рівноваги дельт.

Математична модель динамічно врівноваженої дельти

Дельта ріки є відкритою системою з відомим одним входом і певною кількістю невідомих виходів. Вхід задається витратами наносів через витрати води й ухил, і - враховується у моделі обмеженням 2-го роду. На виходах задаються граничні умови 1-го роду у вигляді висот базису ерозії, які у загальному випадку змінюються у часі.

Як відомо, у стані динамічної рівноваги транспортуюча спроможність потоку дорівнює фактичним витратам наносів. В умовах дельт склад наносів, витрати води й загальні ухили за окремими рукавами дельти можна вважати постійними за довжиною. Тому математична модель структури дельти представляє собою систему рівнянь, які враховують дискретні зміни витрат води та наносів за рукавами. В основу цих рівнянь покладена відома залежність витрат наносів від витрат води та ухилів (Маккавєєв, Чалов, 1986):

$$r = k Q^\alpha I^\beta, \quad (1)$$

де r - витрати наносів; k - коефіцієнт; Q - витрати води; I - ухил.

Для дельти річки Терек, структура якої показана на рисунку, система рівнянь має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(H_0 - H_1)^\beta}{RR_{0,1}} = \frac{(H_1 - H_2)^\beta}{RR_{1,2}} + \frac{(H_1 - H_{\min})^\beta}{RR_{1,7}} \\ \frac{(H_1 - H_2)^\beta}{RR_{1,2}} = \frac{(H_2 - H_{\min})^\beta}{RR_{2,4}} + \frac{(H_2 - H_3)^\beta}{RR_{2,3}} \\ \frac{(H_2 - H_3)^\beta}{RR_{2,3}} = \frac{(H_3 - H_{\min})^\beta}{RR_{3,5}} + \frac{(H_3 - H_{\min})^\beta}{RR_{3,6}} \end{array} \right. \quad (2)$$

В цих рівняннях: H_i - висота відповідного вузла дельти; H_{\min} - висота базису ерозії; $RR_{i,j}$ розраховується за формулою:

$$RR_{i,j} = \frac{l_{i,j}^\beta}{Q_{i,j}^\alpha},$$

де $l_{i,j}$ - довжина рукава; $Q_{i,j}$ - витрати води в ньому. $H_4 = H_5 = H_6 = H_7 = H_{\min}$.

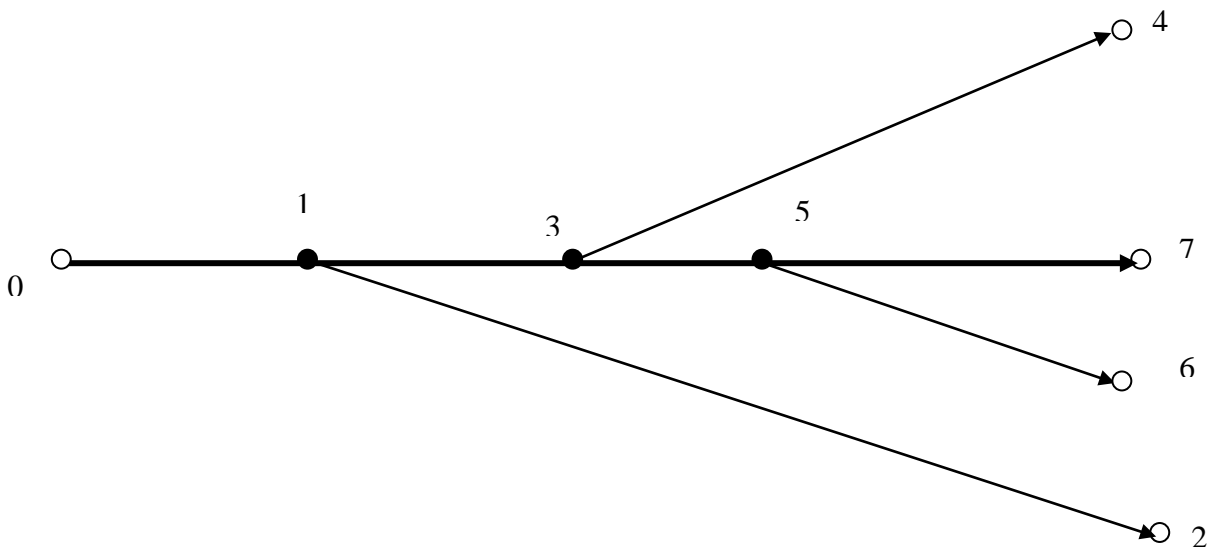


Рисунок Граф структури дельти р. Терек

0,1,2,...,7 – номери вершин графу. Стрілками показані напрямки течії
12 - Батмаклінський ;34 - Кубякінський;56 - Куні ;57 – Головний рукав

Універсального аналітичного рішення подібні системи рівнянь не мають. Тому ми розробили алгоритм дискретного моделювання системи динамічно врівноважених профілів дельти будь-якої структури. Алгоритм розрахунку системи врівноважених профілів дельти такий:

1. Розраховуємо ухил річища, який забезпечує врівноважений транспорт наносів на вході системи:

$$2. \quad I_0 = \left(\frac{r_0}{RR} \right)^{1/\beta} \frac{1}{(Q_0)^{\alpha/\beta}}$$

Цей ухил приписуємо всім рукавам дельти та розраховуємо висоти в її вузлах:

$$H_i = H_j + I_0 l_{i,j},$$

де i, j - номери створів вузлів, причому $i < j$.

3. Виходячи з розрахункового ухилу та відомих витрат води, перевіряємо: чи виконується баланс наносів у верхньому вузлі дельти.

4. Якщо $r_{j,n} + r_{j,m} \neq r_{i,j}$, де $r_{i,j}$ - витрати наносів на вході; $r_{j,n}$ і $r_{j,m}$ - витрати наносів на виході з вузла, то при колишніх значеннях висот суміжних, розташованих нижче вузлів ділення дельти, розраховуємо у даному вузлі висоту H'_j , при якій виконується рівняння балансу наносів у вузлі j .
5. Для збереження розрахованих раніше ухилів, які забезпечують врівноважений баланс, до всіх, розрахованих раніше, висот, вище розташованих вузлів, додаємо величину:

$$\Delta H_j = H_j - H'_j$$

6. Якщо $r_{j,n} + r_{j,m} = r_{i,j}$, то H_j лишаємо незмінним.
7. Таку процедуру розрахунків виконуємо для кожного вузла дельти, послідовно зверху вниз.
“Стойкий” ухил рукавів, які закінчуються у морі, не співпадає з фактичним. Використовуючи його, знаходимо прогнозні значення довжин цих рукавів, які забезпечують врівноважений баланс наносів:

$$l'_{i,j} = l_{i,j} + \Delta l_{i,j}; \quad \Delta l_{i,j} = \frac{H_j}{I_{i,j}}$$

На основі цього алгоритму була складена програма на ЕОМ. Результати розрахунків показали, що помилка моделювання профілів рукавів дельти, які забезпечують врівноважений баланс наносів, складає 10^{-4} кг/с. Подібні розрахунки дають можливість прогнозувати інтенсивність акумулятивних процесів і можуть бути основою для проектування висот дамб для закріплення рукавів дельт.

Прогресивна акумуляція, яка веде до висунення дельти в море, знаходиться у прямій залежності від витрат наносів. Швидкість такого висунення для єдиного річища більша ніж швидкість висунення цього ж річища, поділеного на рукави. Тобто – чим менша кількість рукавів тим більш інтенсивною стає прогресивна акумуляція. З іншого боку, ділення річища на рукави стимулює регресивну і зменшує прогресивну акумуляцію. Це дає можливість ставити й вирішувати задачі пошуку структури дельти, яка оптимально регулює обидва види акумуляції. Для вирішення такого типу задач необхідно мати надійні залежності швидкостей висунення рукавів дельти від витрат наносів. У найпростішому випадку такі залежності мають вигляд [1]

$$U_{i,j} = K Q_{i,j}^{\alpha} \left(\frac{H_i - H_j}{l_{i,j}} \right)^{\beta},$$

де $K = const$; $l_{i,j}$ - початкові довжини рукавів, які впадають безпосередньо в море.

Використовуючи початкові умови, можна розрахувати баланси наносів та акумуляцію у вузлах дельти для різних варіантів її структури. Оптимальним буде варіант, який забезпечує мінімальну регресивну акумуляцію.

Алгоритм оптимізації перерозподілу витрат води і наносів для підтримки врівноваженого стану дельти річки

Для стабілізації транспорту наносів поряд з оптимізацією структури дельт доцільно також управляти перерозподілом витрат води в її рукавах. Розглянемо алгоритм вирішення такої задачі на прикладі дельти р. Терек. Згідно з дослідженнями М.І.Алексєєвського і В.М.Михайлова (1983) ухили, які забезпечують врівноважений транспорт наносів у дельті цієї річки можна розрахувати за допомогою формули:

$$I = K \frac{r^{3/4}}{Q},$$

де $K = 9 * 10^{-5}$; r - витрати наносів; Q - руслоформуєчі витрати води. Звідси:

$$r_{i,j} = \frac{(H_i - H_j)^{4/3}}{RR_{i,j}},$$

де i, j - номери вузлів, суміжних відповідному рукаву дельти; $RR_{i,j} = \left(\frac{K * l}{Q} \right)_{i,j}^{4/3}$; l - відстань

між вузлами i, j . Витрати води, витрати наносів, ухили та довжина рукавів показані у таблиці 1, яка представляє собою матрицю суміжностей.

Розрахунки починаємо від базису ерозії, висота якого є відомою. У даному прикладі:

$$H_2 = H_6 = H_7 = H_4 = H_{\min}$$

Висоту кожного вузла дельти можна знайти з 2-х рівнянь, наприклад:

$$\frac{(H_5 - H_{\min})^{4/3}}{RR_{5,6}} = r_{5,6} \quad (3)$$

$$\frac{(H_5 - H_{\min})^{4/3}}{RR_{5,7}} = r_{5,7} \quad (4)$$

В таблиці 1 r, Q, I, I - відповідно витрати наносів ($кг/с$), витрати води ($м^3/с$), довжина ($км$) і ухил між відповідними елементами структури. У першому рядку треба читати номер вершини графа, в якій потік починається, а у першому стовпчику – номер вершини, в якій він закінчується. За допомогою даних таблиці розраховуємо шляхом лінійної інтерполяції значення висот у кожному вузлі дельти. Використовуючи ці значення, а також рівняння (3) і (4) розраховуємо $r_{5,6}$ і $r_{5,7}$. Далі розраховуємо відхилення цих теоретичних значень витрат від фактичних. Якщо ці відхилення не перевищують 3% , то рукави характеризуються динамічною рівновагою, якщо перевищують, то такої рівноваги немає.

Таблиця №1. Матриця суміжностей графу, який відображує структуру дельти р. Терек

	0	1	2	3	4	5	6	7
0								
1	$r = 1762$ $Q = 267$ $I = 1,0$							
2		$r = 438$ $Q = 69$ $I = 8,7$ $I = 17 * 10^{-5}$						
3		$r = 1324$ $Q = 198$ $I = 0,3$ $I = 6 * 10^{-5}$						
4				$r = 66$ $Q = 11$ $I = 8,1$ $I = 99 * 10^{-5}$				
5				$r = 1258$ $Q = 187$ $I = 0,6$ $I = 6 * 10^{-5}$				
6						$r = 65$ $Q = 11$ $I = 6,3$ $I = 97 * 10^{-5}$		

7						$r = 1258$ $Q = 187$ $I = 0,6$ $I = 6 * 10^{-5}$		
---	--	--	--	--	--	---	--	--

Таблиця №2. Результати розрахунків параметрів для стабілізації дельти р. Терек

	0	1	2	3	4	5	6	7
0								
1								
2		$H_3 = -26,06$ $\Delta r = 0,4$						
3		$H_3 = -26,06$ $\Delta r = 0,3$						
4				$H_3 = -26,11$ $\Delta r = 17,4$				
5				$H_3 = -26,11$ $\Delta r = 2,2$				
6						$H_3 = -26,2$ $\Delta r = 0,0$		
7						$H_3 = -26,2$ $\Delta r = 0,7$		

У таблиці 2 показані результати розрахунків висот у метрах і відхилень теоретичних і фактичних витрат наносів у %. Як видно з таблиці нестійким є вузол 3 дельти р. Терек, бо максимальне відхилення теоретичних та фактичних витрат тут складає 17,4%. Це означає, що вздовж рукава 3,4 (Кубякінський) відбувається найбільш інтенсивне відкладання наносів. Інші рукави дельти характеризуються стабільним положенням. Наші розрахунки показали, що для підтримки динамічної рівноваги дельти необхідно витрати води у Кубякінському рукаві збільшити з $11 \text{ м}^3/\text{с}$ до $13 \text{ м}^3/\text{с}$. При цьому відхилення фактичних витрат наносів від теоретичних складатиме 0,2%. Можна також, лишаючи незмінними витрати води, зменшити мутність з $6,0 \text{ кг}/\text{м}^3$ до $5,1 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Список літератури

1. Алексеевский Н.И., Михайлов В.Н. теоретические схемы русловых переформирований на устьевых участках рек и их применение в дельте Терека // Водные ресурсы бассейна реки Терек и их использование. – Ростов н/Д, 1983. – С. 79 – 91.
2. Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 264 с.
3. Московкин В.М., Куценко Н.В. Моделирование выработанного профиля речной долины с помощью уравнения баланса наносов // Геоморфология. – 1983. - № 3. – с.48 – 55.