

УДК 551.482.212(282.254.43)

Н. И. Алексеевский, В. Н. Михайлов, А. Ю. Сидорчук

ГИДРОЛОГО-МОРФОМЕТРИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РУСЛА В НИЗОВЬЯХ Р. ТЕРЕКА¹

Развитие дельт в устьях рек, впадающих в морские заливы, обычно стадийно: вначале формируется дельта выполнения, а затем дельта выдвижения. Процесс формирования каждой из них цикличен и заключается в последовательном развитии серии наложенных и причлененных частных дельт [3, 4, 6]. Повышенная динамичность гидрографической сети особенно характерна для дельт рек с повышенным стоком наносов. В этом случае цикл развития частных дельт может включать прорыв вод по новому направлению (в пониженные части дельты), озерно-плавневый этап, формирование многорукавной, а затем малорукавной наложенной дельты, формирование дельты выдвижения. Процессы подобного рода характерны и для Терека [1, 3, 4], который переносит в среднем 17,1 млн. т наносов при среднем годовом стоке воды 8,54 км³. За последние 500 лет в дельте Терека произошло 7 полных циклов развития частных наложенных и причлененных дельт с формированием систем дельтовых рукавов Куру-Терека (XVI в.), Сулу-Чубутлы (XVII в.), Старого (начало XVIII в.) и Нового (конец XVIII в.) Терека, Бороздинской прорыва (начало XIX в.), Таловки (конец XIX в.), Каргалинского прорыва (начало XX в.). Наиболее изучен последний, еще не заверченный цикл [1, 3, 4]. В 1914 г. Терек прорвался в пониженную южную часть дельты, образовав так называемый Каргалинский прорыв, предворивший озерно-плавневый этап развития новой наложенной дельты. По мере заполнения озер и плавней наносами на поверхности старой дельты Терека начался процесс формирования многорукавной наложенной дельты. Часть водотоков постепенно отмерла, и наступил этап малорукавной дельты. Одновременно началось выдвижение причлененной дельты выполнения Аграханского залива. После искусственного вывода вод Терека в открытое море [3] на морском берегу возникла и стала развиваться причлененная выдвинутая дельта.

Формирование причлененных дельт ведет к устьевому удлинению русла, которое сопровождается отложением наносов и повышением отметок дна на устьевом участке реки. Наиболее активно этот процесс развивается в непосредственной близости от моря. В свою очередь,

¹ Доложено на Ломоносовских чтениях 19 апреля 1984 г.

накопление наносов в руслах водотоков ведет к уменьшению их пропускной способности и увеличению опасности затоплений дельты в период паводков. В результате сельского хозяйству может быть нанесен заметный ущерб [2]. Возникает необходимость в искусственном регулировании и стабилизации русла с целью уменьшения вероятности затопления территории дельты. Ниже рассмотрены некоторые возможности регулирования магистрального рукава Терека на этапе формирования малорукавной дельты.

Для изучения данной проблемы использован метод математического моделирования выработанного продольного профиля дна на устьевом участке реки. Выработанным продольным профилем устьевого участка реки называется такой профиль дна, при котором русло находится в состоянии динамической устойчивости и отсутствуют его направленные перестроения [5]. Из уравнения деформации

$$\frac{\partial R_0}{\partial x} + \frac{B}{\rho_n} \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

следует, что если $\partial z/\partial t = 0$, то $\partial R_0/\partial x = 0$, а $R_0 = \text{const}$, т. е. при выработанном продольном профиле расход руслообразующих наносов вдоль устьевого участка реки неизменен. В уравнении (1) принято: R_0 — расход руслообразующих наносов; Z — отметка поверхности дна; B — ширина русла; ρ_n — плотность донных отложений; x и t — пространственная и временная координаты соответственно.

Важным условием формирования выработанного профиля дна на устьевом участке является прекращение процесса устьевого удлинения русел дельтовых водотоков. Если оно не выполняется, то вследствие увеличения длины реки уменьшаются уклоны водной поверхности, скорости течения и изменяется баланс руслообразующих наносов. Поэтому стабильность морского края дельты играет роль необходимого условия существования выработанного профиля дна на устьевом участке реки. Стабильность морского края дельты и неизменность ее длины достигаются при равенстве расходов барообразующих речных наносов (G_p) и наносов, уносимых с морского края дельты вследствие воздействия морского волнения (G_m):

$$G_p - G_m = H_0 B^* \sigma \frac{dl}{dt} = 0, \quad (2)$$

где H_0 — высота конуса выноса частной дельты выдвигания; B^* — его ширина; σ — коэффициент, учитывающий отличие формы конуса выноса от прямоугольной.

Примем, что расход барообразующих наносов пропорционален общему расходу речных наносов ($G_p = kR_0^*$), а количество уносимых наносов из зоны барообразования пропорционально мощности ветрового волнения ($G_m = k_2 N_0 B^* Y$), где N_0 — удельная мощность ветрового волнения в дж/с·м; Y — отношение уклона морского края дельты к первоначальному уклону взморья. В этом случае для условий однорукавной приращенной дельты ее выдвигание за 1 год (Δl) будет равно [6]:

$$\Delta l = \frac{a}{H_0} \frac{R_0^*}{B^*} \frac{W - b}{W}, \quad (3)$$

где $W = R_0^*/(N_0 B^* Y)$. По данным развития дельты Терека за период 1973—1983 гг., параметры уравнения (3) равны: $a = 1040$ и $b = 0,032$.

Из уравнения (3) следует, что новая дельта Терека прекратит

выдвижение на взморье при условии $W=0,032$. В настоящее время в зону барообразования поступает в среднем 284 кг/с наносов, в перспективе, когда расход воды в реке уменьшится до 85 м³/с, эта величина составит 153 кг/с.

Следовательно, условие $\Delta l=0$ будет достигнуто при удельной мощности морского волнения, соответственно равной 8,52 и 4,59 дж/с·м. Такие величины N_0 реализуются, как показали проработки режимных характеристик ветра на взморье р. Терек за период 1930—1965 гг., соответственно на современных изобатах 5 и 3 м. Следовательно, предельная длина дельты выдвижения может составить ~2,5 км (в современных условиях стока наносов и уровня Каспийского моря — 28,5 м·абс.), а в перспективе ~1,6 км.

Главное условие существования русла с выработанным продольным профилем дна требует неизменности расхода руслообразующих наносов вдоль устьевого участка реки $\partial R_0/\partial x=0$. Это условие выполняется, если при постоянстве расхода воды поток способен транспортировать все руслообразующие фракции наносов, поступающие к вершине дельты, или содержание руслообразующих наносов (S_p) вдоль реки неизменно. Если через c обозначить долю руслообразующих фракций наносов в составе взвеси, а через ρ — мутность воды на устойчивом участке реки (с. Степное — ст. Каргалинская), расположенном выше вершины дельты, то $S_p=c\rho$.

Для определения S_p разработано большое число эмпирических и полуэмпирических формул. Нами получена соответствующая зависимость для низовий р. Терек. Обоснование формулы выполнено по данным измерений мутности вакуумным батометром на 7—10 горизонтах с последующим определением содержания руслообразующих фракций наносов и S_p . Одновременно производилось измерение гидравлических характеристик потока. Подбор структуры расчетной зависимости показал, что наилучшее соответствие натурным данным достигается при использовании выражения, в котором содержится член Vh :

$$S_p = A \left(\frac{V - V_n}{V_n} \right)^2 Vh, \quad (4)$$

где V и V_n — средняя и неразмывающая скорость; h — средняя глубина потока; $A=0,063$ — размерный (кг·с/м⁵) эмпирический коэффициент. Наличие в (4) члена Vh является отличительной чертой этой формулы по сравнению с другими существующими зависимостями и может, в частности, свидетельствовать о большем влиянии на перенос крупных частиц во взвеси степени турбулизации потока (числа Рейнольдса) по сравнению со степенью его кинетичности (числа Фруда) в условиях низовьев р. Терек.

Поскольку в формулу (4) входят средние значения скорости и глубины потока, величина которых зависит от колебаний расхода воды в реке, логично найти уравнения, определяющие эти характеристики в русле с выработанным продольным профилем дна. Для этой цели уравнение (4) необходимо решать совместно с уравнением расхода воды:

$$Q = BVh. \quad (5)$$

Тогда, принимая для расчета V_n формулу Шамова

$$V_n = 3,7d^{1/3}h^{1/6}, \quad (6)$$

где d — медианный диаметр донных отложений, получаем выражения для скорости $V_{i,j}$ и глубины $h_{i,j}$ в каждой i -й точке русла при j -м расходе воды:

$$V_{i,j} = \sqrt[3]{\frac{2565d_j^2 Q_j}{B_{i,j}} \left(1 + \sqrt{\frac{B_{i,j} S_{p,i,j}}{0,063Q_j}}\right)^6}, \quad (7)$$

$$h_{i,j} = \frac{Q_j}{B_{i,j} V_{i,j}}. \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8), в частности, следует, что в русле реки с выработанным продольным профилем дна при увеличении Q и неизменном S_p возрастают V и h . Наоборот, при постоянном расходе воды и увеличении мутности S_p скорость потока увеличивается, а его глубина уменьшается.

Чтобы установить положение кривой свободной поверхности в условиях выработанности профиля дна, необходимо дополнительно привлечь уравнение движения воды, в котором гидравлические характеристики заданы в соответствии с уравнениями (7) и (8). Кроме того, необходимо задать формулу для расчета коэффициента Шези (C). Для случая неравномерного движения потока имеем в конечных разностях

$$\xi_{i,j} = \xi_{i-1,j} + \frac{V_{i,j}}{g} (V_{i-1,j} - V_{i,j}) + \frac{V_{i,j}^2 \Delta x}{C_{i,j}^2 h_{i,j}}, \quad (9)$$

где ξ_i — отметки водной поверхности; Δx — расчетная длина участка. Коэффициент C во многом определяет точность вычислений $\xi_{i,j}$ и для низовий Терека, по результатам наших исследований, может быть задан по эмпирической зависимости

$$\frac{C_{i,j}}{\sqrt{g}} = \sqrt{420 \left(\frac{h_{i,j}}{d_{i,j}}\right)^{1/3} \frac{V_{i,j}}{\sqrt{gh_{i,j}}}}. \quad (10)$$

Формула (9) отличается от уравнения Штриклера-Маннинга наличием члена, пропорционального числу Фруда. Физический смысл этого факта становится очевидным, если учесть, что с увеличением числа Фруда происходят смыв донных песчаных гряд, уменьшение коэффициента гидравлического трения и увеличение коэффициента Шези.

Подставляя в (9) значения V , h и C соответственно по (7), (8) и (10) и задавая начальную (нижнюю) отметку уровня воды ξ_{i-1} , легко рассчитать отметки водной поверхности выше по течению ξ_i . Затем расчет повторяется при $\xi_{i-1} = \xi_i$ и т. д. В результате уклоны этой поверхности $I = -\Delta \xi / \Delta x$.

Качественно высотное положение продольного профиля водной поверхности в зависимости от определяющих факторов (Q , S_p) может быть определено по уклону I . Если в уравнение (9) ввести вместо V и h выражения (7) и (8), то оно приводится к виду

$$I = k_3 \frac{S_p^n}{Q^m}, \quad (11)$$

где n , m , k_3 — эмпирические параметры (для условий нижнего течения Терека они приблизительно равны 0,75; 0,25; $5,4 \cdot 10^{-5}$). Уравнение (11) показывает, что при увеличении Q и уменьшении S_p величина уклона уменьшается и, наоборот, увеличивается при противоположном характере изменения Q и S_p . При уменьшении Q и увеличении S_p продольный профиль дна повышается. Многообразие форм проявления русловых переформирований на устьевом участке реки в условиях из-

менения определяющих факторов отражено в теоретических схемах развития профиля реки, предложенных в [7].

Отметку дна в створе i можно определить по рассчитанной отметке уровня воды $\xi_{i,j}$ и глубине $h_{i,j}$:

$$Z_{i,j} = \xi_{i,j} - h_{i,j}, \quad (12)$$

а деформации русла относительно начальных условий Z_{i0} :

$$\Delta Z_{i,j} = Z_{i0} - Z_{i,j}. \quad (13)$$

Деформации $\Delta Z_{i,j}$, рассчитанные таким образом для каждого расхода воды, не могут характеризовать реальных переформирований русла, связанных с прохождением по реке всего диапазона расходов воды. Поэтому для расчета продольного профиля дна, созданного всем диапазоном Q_j , необходимо найти весовую функцию, учитывающую вклад каждого Q в процесс формирования выработанного профиля.

Требуемую функцию можно получить на основе уравнения деформаций (1) при условии, что временное изменение расхода наносов вдоль русла носит степенной характер, т. е. при переходе к выработанному продольному профилю дна справедливо утверждение:

$$\frac{\partial R}{\partial x} = \frac{\partial R_0}{\partial x} \left(1 - \frac{T}{T_0}\right)^\alpha, \quad (14)$$

где T_0 — время формирования выработанного продольного профиля; α — параметр. В случае принятия гипотезы (14) интегрирование уравнения (1) дает формулу для оценки величины общей деформации русла при изменении Q в пределах $Q_1 \leq Q_j \leq Q_M$:

$$\Delta Z \approx \sum_{j=1}^M \frac{Q_j}{B_j} \left(\frac{\partial S_{p,j}}{\partial x} \right)_0 T_j, \quad (15)$$

где T_j — время воздействия расхода Q_j на русло реки (может характеризоваться повторяемостью данного расхода P_j). Изменение мутности $\partial S_{p,j}/\partial x$ в дельте Терека практически не зависит от расхода воды, следовательно, в качестве весовой функции для деформаций ΔZ можно принять произведение $Q_j P_j / B_j$. Это произведение напоминает функцию, предложенную Н. И. Маккаевым [5] при расчете величины руслоформирующего расхода воды и имеет тот же физический смысл.

Отметки свободной поверхности при расходе Q_M в русле реки с продольным профилем, выработанным всем диапазоном расходов воды (эквивалентный профиль русла), рассчитываются по уравнению

$$Z_{\text{экр},t} = \frac{\sum_{j=1}^M Z_{i,j} Q_j P_j / B_j}{\sum_{j=1}^M Q_j P_j / B_j} + h_i. \quad (16)$$

При этом предполагается, что эквивалентный профиль дна является недеформируемым.

Время формирования выработанного профиля дна можно оценить по формуле

$$T_0 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta Z_{\text{экр},i} B_{\text{ср}} \Delta x (\alpha + 1)}{\Delta R_0}. \quad (17)$$

Таким образом, положение свободной поверхности воды на устьевом участке и, следовательно, вероятность затопления прилегающей территории зависят от ряда характеристик: расчетного расхода воды Q_m и мутности S_p во входном створе реки, диапазона изменений Q и вида кривой, повторяемости P_j , ширины и длины расчетного участка, уровня приемного водоема, характеристик донных грунтов, извилистости русла. Количественный аспект роли некоторых из перечисленных характеристик выявлен на основе численных экспериментов. Анализ полученных результатов, а также уравнений (7)—(8), (11), (16) дает возможность выбрать оптимальные мероприятия, стабилизирующие положение магистрального рукава в пределах устьевой области р. Терек.

Землечерпание в русле реки приводит к изменению начальных отметок продольного профиля дна ($Z_{i,0}$). Эта переменная не входит в явном виде в уравнение (16), поэтому землечерпание является временной мерой, приводящей к увеличению времени формирования выработанного профиля, как это следует из (17). Расчеты показывают, например, что углубление русла на устьевом участке р. Терек на 1 м увеличит T_0 на 50—80 лет (при $\alpha=1-2$).

С землечерпанием может быть сопряжено водостеснение — уменьшение ширины русла. На первый взгляд это очень эффективная мера: уменьшение B на 10—20 м приводит к уменьшению отметок выработанного профиля дна на 0,5 м. Однако одновременно и гораздо сильнее увеличивается (на 0,8—1,0 м) глубина потока при конкретном Q_j и, следовательно, растут отметки горизонта паводочных вод.

Весьма существенной мерой стабилизации дельтовых рукавов является спрямление русла, т. е. уменьшение его длины. Это ведет к увеличению уклонов, скоростей течения и понижению отметок дна и водной поверхности. Например, уменьшение длины русла р. Терек на 4 км ниже Каргалинского гидроузла привело к понижению отметок в верхней части 30-километрового участка на 0,5 м (при $Q=800-1000$ м³/с). Аналогичное явление наблюдалось при выводе стока р. Терек непосредственно в море по прорези через Аграханский п-ов, когда длина устьевое участка уменьшилась на 25 км. В результате уровни воды в период прохождения максимальных расходов снизились в 5—10 км от моря на 1,8—2,0 м.

Обвалование русла при невыработанном продольном профиле является временной мерой стабилизации дельтовых рукавов. По мере повышения отметок дна противопаводочные валы приходится наращивать. Наличие валов вдоль русла приводит к уменьшению (понижению) отметок выработанного профиля дна, поскольку при их наличии русло реки в состоянии пропустить более высокие расходы воды. Одновременно будет происходить и некоторое повышение отметок воды, поскольку увеличивается скорость нарастания поймы в высоту и постепенно уменьшается пойменная емкость русла.

В условиях выработанности продольного профиля, как показывают расчеты, противопаводочное обвалование является наиболее эффективным средством борьбы с наводнениями. Количественные оценки показывают, что для стабилизации русла Терека ниже Каргалинского гидроузла необходимо дополнительное обвалование, стоимость которого составит примерно 25 млн. руб. Оно может быть осуществлено за 5—10 лет.

Сооружение противопаводочных водохранилищ практически не влияет на положение выработанного продольного профиля дна. Некоторое повышение его отметок вследствие увеличения роли малых рас-

ходов воды компенсируется их снижением за счет уменьшения мутности в нижнем бьефе водохранилищ. Результирующий эффект сооружения водохранилищ в целом ведет к снижению горизонтов высоких вод. Для условий Терека это снижение, согласно расчетам, составит около 1,2 м.

Определенное влияние на положение выработанного профиля дна оказывает хозяйственное использование стока реки для орошения земель в средней части водосбора и в пределах дельты. В результате поступление стока воды в дельту уменьшается и изменяется характер его внутригодового распределения. Одновременно повышаются отметки дна по сравнению с современными. Оказалось, что для паводочных условий стока повышение отметок составит 2,0—2,5 м. Качественное подтверждение этим данным можно получить из анализа уравнения (11). Увеличение уклона водной поверхности при уменьшении расхода воды равнозначно, при прочих равных условиях, накоплению наносов в русле реки. Негативные последствия разбора воды на орошение могут быть ликвидированы, например, за счет сокращения длины реки. Если спрямить крупные изгибы русла на участке 28—60 км ниже Каргалинского гидроузла, то эффект такой меры будет достаточен для компенсации процессов, связанных с уменьшением стока реки.

Таким образом, стабилизация структуры гидрографической сети и защита земель от наводнений в дельте Терека могут быть осуществлены приведением продольного профиля дна к выработанному в условиях перспективного изменения гидрологического и гидравлического режима потока. Решение подобной задачи достигается сокращением длины устьевое участка реки на 10—11 км, сооружением противопаводочного водохранилища, уменьшающего максимальные расходы воды 1%-ной обеспеченности до 1000 м³/с, доведением высоты противопаводочных валов до отметок, превышающих на 0,5 м горизонты воды при $Q_M = 1000$ м³/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байдин С. С., Скриптунов Н. А., Штейман Б. С., Ган Г. Н. Гидрология устьевых областей Терека и Сулака. — Тр. ГОИН, вып. 109, 1971.
2. Алексеевский Н. И., Власов Б. Н., Михайлов В. Н., Сидорчук А. Ю. Защита земель от затопления в низовьях р. Терек. — В кн.: Ученые МГУ — сельскому хозяйству (тезисы докладов). М., 1981.
3. Алексеевский Н. И., Михайлов В. Н., Сидорчук А. Ю. Формирование Каргалинского прорыва р. Терек. — В кн.: Палеогеография Каспийского и Аральского морей в кайнозое. Ч. 1. М., 1983.
4. Байдин С. С. Современные процессы дельтообразования в устье Терека. — Тр. ГОИН, вып. 98, 1970.
5. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М., 1950.
6. Михайлов В. Н., Рогов М. М., Макарова Т. А., Полонский В. Ф. Динамика гидрографической сети неприливых устьев рек. М., 1977.
7. Михайлов В. Н., Алексеевский Н. И. Развитие продольного профиля на устьевом участке реки. — В кн.: Закономерности эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. М., 1981.