



ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УСТЬЕВ РЕК ТЕРЕКА И СУЛАКА

10.1. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА РЕК И УРОВНЯ МОРЯ

Сток воды и наносов рек Терека и Сулака. Прогрессирующее использование водных ресурсов в бассейнах Терека и Сулака будет неизбежно сопровождаться дальнейшим снижением среднего стока воды и наносов этих рек. По И. А. Шикломанову [1989], ожидаются следующие изменения суммарного стока Терека и Сулака при условии сохранения современных климатических условий (табл. 43).

Таблица 43

Ожидаемое уменьшение суммарного годового стока
рек Терека и Сулака
под влиянием хозяйственной деятельности

год	км ³ /год	%
1990	4,0	30
1995	4,2	31
2000	4,5	33
2010	5,0	37

Примечание. Естественный суммарный сток
13,4 км³/год

Сток Терека и Сулака, с учетом данных гл. 2 и 3, составлял в естественных условиях соответственно около 8,9 и 4,5 км³/год, т. е. 66 и 34% суммарного стока обеих рек. Учитывая различие в водоносности рек и большие масштабы хозяйственной деятельности в бассейне Терека, данные в табл. 43 должны быть разделены между реками приблизительно в пропорции 2/3 и 1/3.

Таким образом, можно ожидать, что к 2000 г. сток Терека и Сулака сократится по сравнению с естественным приблизительно на 3 и 1,5 км³/год соответственно и составит в среднем 5,9 и 3 км³/год. В такой же степени может сократиться сток наносов р. Терека. Сток наносов р. Сулака, по-видимому, не уменьшится, поскольку будет несколько восстанавливаться в нижнем бьефе Чиркейского гидроузла.

Уровень Каспийского моря. Изменение уровня Каспийского моря в будущем будет определяться изменением составляющих водного баланса моря, которые зависят от естественных и антропогенных изменений климатических условий в бассейне моря

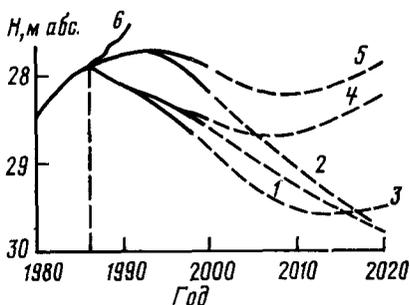


Рис. 33. Возможные изменения уровня Каспийского моря в будущем по прогнозу, составленному в 1986 г. при разных вариантах климатической ситуации по И. А. Шикломанову [1988]. Условные обозначения (1—5) см. в тексте; 6 — фактические изменения уровня моря по 1992 г.

и от величин изъятия стока из впадающих в него рек, и в первую очередь Волги. В зависимости от масштаба воздействия этих факторов прогнозные оценки изменения уровня моря могут заметно различаться между собой.

Рассмотрим результаты прогнозов, разработанных И. А. Шикломановым [1988]. При их разработке учитывалась возможность как сохранения современных климатических условий, так и их антропогенных изменений, связанных с так называемым парниковым эффектом. По прогнозу М. И. Будыко [Шикломанов, 1988], к концу столетия можно ожидать климатически обусловленного уменьшения притока речных вод в Каспийское море, которое затем может ослабевать или даже смениться увеличением этого притока. Осадки на поверхность моря могут увеличиться на 120—150 мм, т. е. на 60%. Испарение с поверхности моря изменится мало. Суммарное же уменьшение притока вод в Каспий вследствие непосредственного воздействия хозяйственной деятельности (в основном при безвозвратном изъятии стока рек) при неизменных климатических условиях может, по И. А. Шикломанову [1988, 1989], к 1990 г. составить 46 км³/год, к 2000 г.—55, к 2010 г.—60, к 2020 г.—65 км³/год. Фактическая величина изъятия стока составила в 1985 г. 38 км³/год.

Учитывая сложность предсказания климатических изменений на далекую перспективу, имеет смысл рассматривать ожидаемые изменения лишь на ближайшие 20 лет.

Согласно прогнозам, составленным в 1986 г. [Шикломанов, 1988], изменение уровня моря может быть различным в зависимости от конкретной климатической ситуации. При стационарной климатической ситуации и средних климатических условиях возможно снижение уровня к 2000 г. на 0,5 м, к 2010 г. еще на 0,7 м (вариант 1 на рис. 33). Если естественный приток в море окажется на 5% выше нормы, а разница между испарением и осадками на поверхности моря—на 5% ниже нормы, то уровень моря должен некоторое время продолжать повышаться, а затем снизиться к 2010 г. более чем на 1 м (вариант 2 на рис. 33). При антропогенных изменениях климата и максимальном уменьшении притока речных вод в море снижение уровня моря будет наибольшим и составит к 2010 г. более 1,6 м (вариант 3 на рис. 33). Если же при антропогенном изменении климата (как

в предыдущем случае) приток в море изменится мало, то снижение уровня к 2010 г. составит 0,4—0,5 м (вариант 4 на рис. 33). При комбинации вариантов 2 и 4 уровень моря изменится слабо (вариант 5 на рис. 33).

Сравнение фактических изменений уровня моря с данными прогноза (см. рис. 33) свидетельствует о том, что процесс пока развивается по сценарию, близкому к вариантам 2 и 5, но с несколько большей величиной подъема уровня.

10.2. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ РУСЛА НА УСТЬЕВОМ УЧАСТКЕ р. ТЕРЕКА

Искусственная стабилизация русла Каргалинского прорыва, достигнутая в четвертый период его развития, в известной мере решила, хотя бы временно, главную водохозяйственную проблему низовьев Терека, а именно проблему борьбы с затоплением территории дельты при высоких паводочных подъемах уровня воды.

Расширение сельскохозяйственного освоения дельты в условиях ожидаемого изменения гидрологического режима реки, решение сложных вопросов сбалансированности потребностей различных водопользователей и охраны уникальной природы низовьев Терека тем не менее не позволяют считать эту проблему окончательно закрытой. Как в бассейне реки, так и в ее дельте планируется значительное увеличение площади орошаемых земель, намечается строительство ряда гидротехнических сооружений, что изменит современные условия формирования русла на устьевом участке реки. Это усилит аккумулятивную направленность деформаций русла вдоль всего устьевого участка реки, при которой может уменьшиться пропускная способность Каргалинского прорыва и возникнуть опасность свала стока реки в пониженную часть дельтовой равнины. Характер развития русла на устьевом участке будет также зависеть от величины устьевого удлинения и положения уровня Каспийского моря.

В связи с изложенным возникает весьма актуальная задача — спрогнозировать изменение продольного профиля русла на устьевом участке р. Терека при разном сочетании определяющих факторов (стока реки, длины русла, уровня моря и др.). Расчет такого русла может базироваться на концепции так называемого выработанного продольного профиля (по Н. И. Маккавееву [1955]), при котором прекращаются направленные русловые деформации.

В основу метода расчета положено уравнение русловых деформаций:

$$\frac{\partial R}{\partial x} = -\sigma B \frac{\partial z_0}{\partial t} \quad (10.1)$$

Здесь R — расход наносов; σ — плотность отложений; z_0 — отметка дна русла.

Условие отсутствия необратимых русловых деформаций ($\partial z_0 / \partial t = 0$) отвечает условие $\partial R / \partial x = 0$, т. е. неизменность расхода наносов вдоль участка. Заменим величину полного расхода наносов величиной расхода наносов руслоформирующих фракций R_p :

$$R_p = k_0 R. \quad (10.2)$$

Если коэффициент k_0 — константа, то условию выработанности продольного профиля русла на устьевом участке будет отвечать и неизменность величины R_p вдоль потока.

В гл. 2 было показано, что мутность, соответствующая транспортирующей способности потока, по смыслу совпадает с мутностью, сформированной русловыми фракциями наносов. Она удовлетворительно описывается формулой типа Россинского—Кузьмина. Использование этой формулы дает возможность рассчитать объемный расход русловых наносов ($\text{м}^3/\text{с}$):

$$R_p = k \frac{v^4 B}{w}, \quad (10.3)$$

где w — гидравлическая крупность наносов; B — ширина русла; k — коэффициент ($\text{с}^3/\text{м}^3$), равный $2 \cdot 10^{-5}$. Уравнение (10.3) вместе с соотношением $Q = Bhu$ позволяет получить зависимости для расчета скорости течения v и глубины русла h :

$$v = 4 \sqrt{\frac{R_p w}{kB}}, \quad (10.4)$$

$$h = \frac{Q}{B^4 \sqrt{\frac{R_p w}{kB}}}. \quad (10.5)$$

Из приведенных уравнений следует, что в русле реки с выработанным продольным профилем дна увеличение Q при постоянстве ρ_p сопровождается уменьшением v и увеличением h . Наоборот, при $Q = \text{const}$ и увеличении ρ_p скорость потока возрастает, а глубина уменьшается.

Положение кривой свободной поверхности в условиях выработанности профиля дна устанавливается с помощью решения уравнения движения воды, в котором гидравлические характеристики заданы в соответствии с уравнениями (10.4) и (10.5). Для случая неравномерного движения потока имеем в конечных разностях

$$z_{i,j} = z_{i-1,j} + \frac{v_{i,j}}{g} (v_{i-1,j} - v_{i,j}) + \frac{v_{i,j}^2}{C_{i,j}^2 h_{i,j}} \Delta x. \quad (10.6)$$

Здесь $z_{i,j}$ — отметка водной поверхности; Δx — длина расчетного участка; C — коэффициент Шези. Для условий низовьев Терека авторами получена эмпирическая зависимость для C , учитыва-

ющая как крупность влекаемых наносов d , так и число Фруда, влияющее на грядовую шероховатость:

$$\frac{C_{i,j}}{\sqrt{g}} = \sqrt{420 \left(\frac{h_{i,j}}{d_{i,j}}\right)^{1/3} \frac{v_{i,j}}{\sqrt{gh_{i,j}}}} \quad (10.7)$$

Подстановка в (10.6) значений v , h , C в соответствии с уравнениями (10.4), (10.5) и (10.7), а также задание начальной (нижней) отметки уровня воды $z_{i-1,j}$ позволяют получить отметки $z_{i,j}$ на вышерасположенном участке реки. В результате можно рассчитать продольный профиль водной поверхности и ее уклоны: $I = -\Delta z / \Delta x$.

Отметка дна в i -м створе может быть определена по рассчитанной отметке уровня воды $z_{i,j}$ и глубине $h_{i,j}$:

$$z_{0,i,j} = z_{i,j} - h_{i,j}, \quad (10.8)$$

а изменение отметок дна русла $\Delta z_{0,i,j}$ относительно начальных условий $z_{0,i,0}$ — по уравнению

$$\Delta z_{0,i,j} = z_{0,i,j} - z_{0,i,0}. \quad (10.9)$$

Рассчитанные деформации дна для каждого расхода воды (из заданного диапазона изменений Q на верхней границе устьевого участка реки) не могут характеризовать реальные переформирования русла, связанные с прохождением всех расходов Q_j . Поэтому для получения продольного профиля дна, формируемого всем фактическим диапазоном Q , необходимо подобрать весовую функцию, учитывающую вклад конкретного расхода воды в процессе достижения выработанности продольного профиля русла реки.

Весовую функцию можно получить из уравнения деформаций при условии, что изменение расхода наносов подчиняется степенному закону:

$$\frac{\partial R_T}{\partial x} = \left(1 - \frac{T}{T_0}\right)^\alpha, \quad (10.10)$$

где T_0 — время формирования выработанного продольного профиля; α — коэффициент, равный для устьевого участка Терека 1,0—2,0. В случае принятия этой гипотезы интегрирование уравнения (10.10) дает формулу для оценки величины общих деформаций русла при изменении Q в пределах $Q_1 \leq Q_j \leq Q_m$:

$$\Delta z_{0,i} = \sum_{j=1}^m \frac{Q_j}{B_j} \left(\frac{\partial \rho_{p_j}}{\partial x}\right) T_j, \quad (10.11)$$

где T_j — время воздействия расхода Q_j на русло реки, характеризуемое повторяемостью данного расхода воды p_j . В дельте Терека эта гипотеза подтверждается малой зависимостью $\partial \rho_p / \partial x$ от расхода воды, и, следовательно, здесь в качестве весовой функции для учета влияния Q_j на деформации русла можно принять

выражение $Q_j p_j / B_j$. Оно напоминает функцию, рекомендованную Н. И. Маккавеевым [1955] для определений руслоформирующего расхода воды, и имеет тот же физический смысл.

Отметки дна при расходе Q_m в русле с продольным профилем, выработанным всеми расходами воды (эквивалентный профиль дна), вычисляются по уравнению

$$z_0 \text{ экв.} = \sum_{j=1}^m \frac{Q_j p_j}{B_j} \Delta z_{0, j} / \sum_{j=1}^m \frac{Q_j p_j}{B_j}. \quad (10.12)$$

Для расчетов по приведенным уравнениям необходимо задание начальных и граничных условий.

В качестве начальных условий принимаются данные об изменении отметок дна вдоль устьевого участка реки, т. е. $z_0 = z_0(x, 0)$. Для условий нижнего течения р. Терка эта информация задана на основе исследований института «Севкавгипроводхоз» и экспедиции МГУ в 1979—1980 гг. Начальные отметки дна приняты по результатам подробного эхолотирования русла Каргалинского прорыва в 1979—1980 гг. и последующего их анализа. Дискретность задания отметок дна определялась характером продольного изменения этих характеристик. На участках русла с плавным изменением очертаний продольного профиля исходные данные снимались с меньшей, а при значительной изменчивости — с большей дискретностью. В общем случае начальный продольный профиль дна характеризуется произвольным числом значений отметок дна.

Данные о ширине русла $B = B(x)$ и медианном диаметре донных отложений $d = d(x)$ получены на основе детальной плановой съемки Каргалинского прорыва в 1979 г. и данных отбора образцов донных грунтов в 1979—1980 гг. Если гранулометрический состав отложений относительно стабилен, то ширина реки вдоль устьевого участка изменяется в широких пределах, причем наблюдается чередование участков русла с $dB/dx < 0$ и $dB/dx > 0$.

Граничные условия характеризуют изменчивость факторов руслового процесса на нижней (морской) и верхней (речной) границах устьевого участка реки. Речные факторы учитывались заданием расчетного гидрографа стока: $Q = Q(0, j)$; отметок водной поверхности в начальном и конечном створах: $z_n = f(0, j)$, $z_x = \phi(L, j)$ где L — длина участка реки; мутности, соответствующей транспортирующей способности потока: $\rho_{тр} = f_1(Q)$. Диапазон изменений расхода воды в нижнем бьефе Каргалинского гидроузла был разбит на 17 интервалов. Первый интервал включал расходы воды до 100, а последний — до 1700 м³/с. Вследствие относительно малого изменения расходов воды вдоль устьевого участка принималась гипотеза $Q_{i,j} = Q_j$, где i, j — индексы пространственного изменения Q и временного расчленения расчетного гидрографа.

Расчет продольного профиля сделан для варианта ожидаемого уменьшения стока реки (см. разд. 10.1), когда расход воды

у Каргалинской снизится до $235 \text{ м}^3/\text{с}$, а в нижнем бьефе Каргалинского гидроузла—до $160 \text{ м}^3/\text{с}$. На основе типового распределения стока воды в течение года (см. гл. 2) можно получить данные о средних месячных расходах воды в дельте Терека в условиях более полного использования водных ресурсов реки.

Из приведенных выше уравнений следует, что важную роль для формирования выработанного и эквивалентного профиля дна играет не только величина, но и повторяемость расхода воды Q_j . Эти данные были рассчитаны для вариантов среднего, многоводного и маловодного периодов по результатам осреднения фактических кривых повторяемости ежедневных расходов воды (см. гл. 2).

В качестве функции, описывающей руслоформирующее значение каждого расчетного значения Q_j , принята зависимость $R_{p,p} = f(Q)$, построенная для нижнего бьефа Каргалинской плотины:

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$R_{p,p}, \text{ кг/с}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$R_{p,p}, \text{ кг/с}$
100	5000	1000	300
200	5500	1100	—
300	2100	1200	100
400	1400	—	—
500	1150	1300	100
600	450	1400	80
700	600	1500	50
800	250	1600	30
900	250	1700	20

Поскольку обвалование русла будет осуществляться на фоне снижения водоносности реки (орошение, сооружение водохранилищ), то можно ожидать некоторого увеличения повторяемости расходов в диапазоне $0—200 \text{ м}^3/\text{с}$ и уменьшения повторяемости максимальных расходов воды ($1000—1700 \text{ м}^3/\text{с}$). В расчетах было принято, что для учета этих процессов достаточно на 1% соответствующим образом изменить повторяемость характерных интервалов изменения расходов воды.

В качестве граничного условия необходимо также задать значение мутности $\rho_{\text{тр}}$ для верхнего створа на исследуемом участке реки. Из (10.3) получаем

$$\rho_{\text{тр}} = R_p / Q = kv^4 B / (wQ). \quad (10.13)$$

Величина фактической мутности воды совпадает со значением $\rho_{\text{тр}}$, если на участке реки отсутствуют направленные деформации русла. Таким условиям отвечает и отрезок реки между с. Степным и ст. Каргалинской, где переформирования русла носят циклический характер. Это дает основание принять среднюю годовую мутность воды на участке реки выше вершины дельты ($1,8 \text{ кг/м}^3$) в качестве соответствующего значения $\rho_{\text{рт}}$.

В расчетах используется разделение диапазона изменения расходов воды на 17 интервалов; каждому из них будет отвечать

своя величина $\rho_{тр}$. Для задания их значений при произвольном Q_j воспользуемся уравнением (10.3). При известных Q_j , B_j и $h_j = h_{уст}$, где $h_{уст} = 0,9 (g B_j)^{0,25} / Q_j^{0,5}$ — «устойчивая» глубина водного потока [Гришанин, 1974], удается определить граничное условие $\rho_{тр} = \rho(0, j)$. На нижней границе расчетного участка реки требуется задание отметок водной поверхности $z_k = \varphi(L, j)$. Поскольку сток р. Терека несущественно влияет на колебания уровня Каспийского моря, то в данном случае эту величину можно считать независимой от Q_j и принимать эту характеристику по наблюдениям за уровнем моря у г. Махачкалы. В перспективе (см. разд. 10.1) уровень моря может измениться, однако существует большая вероятность его стабилизации на отметках, близких к современным. Тем не менее при исследовании возможного развития устьевого участка реки целесообразно рассматривать варианты разнонаправленных колебаний уровня приемного бассейна.

Существенное воздействие на характер русловых деформаций оказывает длина устьевого участка. Величина устьевого удлинения зависит от многих факторов, и ее учет требует специального изучения (см. гл. 6). В ближайшие 10—20 лет влияние процессов устьевого удлинения, в первом приближении, можно не учитывать вследствие его малой величины (см. разд. 10.3).

Для решения уравнений, описывающих выработанный продольный профиль дна, предложен алгоритм, который позволяет рассчитывать глубину и скорость течения, мутность, соответствующую транспортирующей способности потока, а также отметки дна выработанного продольного профиля и отметки водной поверхности. Расчет отметок водной поверхности ведется путем подбора ее уклонов, при которых достигается равенство между рассчитанной и фактической отметками поверхности воды в начальном и конечном створах при заданных значениях Q_j . Алгоритм позволяет также вычислить деформации начального продольного профиля дна, отметки эквивалентного профиля устьевого участка реки и время его формирования.

В ходе численных экспериментов рассматривались различные варианты развития русла Каргалинского прорыва при изменении определяющих условий. При этом принималось во внимание возможное влияние на изменение условий руслоформирования выправительных работ и спрямлений русла, сокращения поступающего в дельту стока воды и наносов (разбор воды на орошение, сброс паводочных вод в пески и плавни, сооружение противопаводочных водохранилищ), а также обвалования русла вдоль устьевого участка реки.

С учетом особенностей русловых переформирований в последний период развития Каргалинского прорыва принято, что характер руслового процесса на устьевом участке реки будет зависеть в основном от наличия местного базиса эрозии на 90-м километре от Каргалинского гидроузла, имеющего отметку —27,5 м БС. Поэтому эффект обвалования русла в современных условиях целесообразно выявить на участке реки выше местного

базиса эрозии, поскольку влияние устьевое удлинения в данном случае будет ограничено нижними 15—17 км реки.

Для каждого расхода воды оказалось характерным свое положение выработанного профиля дна. Данные об отметках этого профиля для выбранных интервалов расхода воды использованы при получении осредненных отметок дна. С учетом расчетного гидрографа и его вклада в руслоформирование, а также путем соответствующих операций «взвешивания» частных выработанных профилей получаем отметки эквивалентного профиля дна на устьевом участке Терека (табл. 44) при различных уровнях Каспийского моря.

Таблица 44

Отметки эквивалентного продольного профиля русла на устьевом участке р. Терека при различных уровнях Каспийского моря (м абс.)

Расстояние от Каргалинского гидроузла, км	Отметка дна (м абс.) при уровне моря			Расстояние от Каргалинского гидроузла, км	Отметка дна (м абс.) при уровне моря		
	-31,0	-28,6	-26,0		-31,0	-28,6	-26,0
0	-2,78	-2,78	-2,78	55	-17,42	-16,03	-15,10
5	-6,99	-6,91	-6,86	60	-18,67	-17,13	-16,11
10	-5,86	-5,68	-5,56	65	-20,10	-18,40	-17,28
15	-7,26	-6,96	-6,75	70	-22,29	-20,42	-19,18
20	-8,08	-7,65	-7,37	75	-23,00	-20,96	-19,60
25	-9,72	-9,17	-8,80	80	-25,28	-23,11	-21,66
30	-9,80	-9,12	-8,67	85	-27,49	-25,16	-23,61
35	-10,83	-10,00	-9,46	90	-29,17	-26,70	-25,05
40	-12,59	-11,64	-11,00	95	-29,86	-27,23	-25,47
45	-15,10	-13,99	-13,25	100	-31,32	-28,52	-26,64
50	-15,75	-14,50	-13,66	105	-32,94	-29,94	-27,94

Примечание. Морской край «новой» дельты Терека расположен в настоящее время на расстоянии 106,1 км от Каргалинского гидроузла.

Формирование русла при повышающемся уровне моря сопровождается повышением отметок эквивалентного профиля, и оно проявляется тем сильнее, чем ближе к морю находится расчетный створ. Противоположная картина наблюдается в условиях снижения уровня приемного водоема. В непосредственной близости от моря снижение уровня на 2 м вызывает практически такое же понижение отметок дна.

Сравнение отметок полученного эквивалентного и фактического профиля дна реки за 1979—1980 гг. показывает, что при стабильном положении уровня моря на верхнем и нижнем отрезках расчетного участка реки они практически совпадают. В средней части Каргалинского прорыва фактическая поверхность дна расположена ниже, чем это следует из данных расчета. Указанное расхождение может свидетельствовать о возможной тенденции развития русла Терека в будущем: русло будет, несколько повышаясь, развиваться в направлении, приближающем фактический профиль к эквивалентному профилю дна.

Отметки водной поверхности для эквивалентного профиля дна при расходах воды малой обеспеченности различным образом соотносятся с отметками современных противопаводочных дамб вдоль устьевого участка реки. Если в верхней части русла противопаводочное обвалование способно удержать в пределах русла максимальные расходы воды без заметного наращивания отметок дамб, то ниже 20—30-го километра от гидроузла необходимо их нарастить примерно на 0,5—1,0 м.

При невыработанном продольном профиле реки обвалование русла — временная мера. По мере повышения отметок дна необходимо периодически наращивать дамбы. Наличие валов приводит, с одной стороны, к снижению отметок выработанного профиля дна вследствие сосредоточения в русле повышенного стока реки, который в естественных условиях должен был аккумулироваться в пониженных частях дельтовой равнины. С другой стороны, увеличение удельных расходов воды и наносов вызывает интенсивное нарастание отметок поймы и, следовательно, ведет к уменьшению пойменной емкости. В результате повышаются отметки паводочных уровней воды.

В условиях сформированного выработанного продольного профиля обвалование русла Каргалинского прорыва будет наиболее эффективным средством защиты дельты р. Терека от затоплений. В этом случае потребуется частичное наращивание противопаводочных валов вдоль устьевого участка реки, на которое потребуется около 25 млн руб. в ценах 1991 г. и которое может быть закончено за 5—10 лет.

Повышение уровня моря в последние годы привело к усилению процессов аккумуляции в нижней зоне устьевого участка реки. В случае дальнейшего повышения уровня моря пропускная способность русла еще больше уменьшится и в период половодья резко возрастет вероятность затопления местности при прорыве дамб обвалования и, следовательно, возникнет опасность перестройки гидрографической сети дельты Терека.

Возможное изменение условий развития русла Каргалинского прорыва и соответствующее понижение отметок водной поверхности могут произойти, если в русле реки будут проведены землечерпательные работы для углубления русла. Расчеты показывают, что углубление русла Каргалинского прорыва на 1 м увеличит время формирования выработанного профиля на 50—80 лет (при показателе степени в формуле (10.10) $\alpha = 1 \div 2$) [Алексеевский и др., 1985].

Чтобы эта мера обеспечила защиту дельты р. Терека от наводнений, необходимо извлечь около 10 млн м³ грунта. Два земснаряда с производительностью 1000 м³/ч могут выполнить такую работу за один год. Малые сроки осуществления работ, их небольшая стоимость и достаточная с инженерной точки зрения эффективность — положительная сторона выправительных мероприятий. Они имеют и отрицательные стороны. Во-первых, это временная мера. Общий срок эффективности работ не превышает 50—80 лет. Больше того, на отдельных участках реки (в расшире-

ниях русла) аккумуляция наносов и повышение отметок дна будут протекать в данном случае гораздо быстрее, и современные условия могут восстановиться в течение нескольких лет. Во-вторых, мощные земснаряды на р. Тереке осложняют экологическую обстановку, нанесут ущерб воспроизводству ценных пород рыб.

Одновременно с углублением русла можно выполнять работы, способствующие стеснению потока. На первый взгляд, как видно по результатам численных расчетов, это очень эффективная мера: уменьшение ширины русла на 10—20 м приводит к понижению выработанного профиля дна на 0,5 м. Однако при этом в большей степени (на 0,8—1,0 м) увеличивается глубина потока для расчетного расхода воды и, следовательно, растут отметки горизонта паводочных вод. Возможно, что это обстоятельство и привело к тому, что стеснение потока как средство защиты от паводочных разливов не использовалось широко в мировой практике.

Как показывает исторический опыт, эффективная мера снижения паводочных уровней в низовьях Терека — спрямление русла. Оно способствует увеличению уклонов водной поверхности, скоростей течения, что влечет за собой интенсивное врезание потока в собственные отложения и коренные породы. Повидимому, этот прием будет использоваться в дельте р. Терек и в дальнейшем, чему способствует высокая степень извилистости русла.

Коэффициент извилистости русла Каргалинского прорыва равен 1,17. Поэтому спрямление излучин, имеющих длину до 1 км, только в его нижней зоне может сократить длину устьевого участка реки на 15 км. Изгибов русла с коэффициентом извилистости 1,4—1,6 по длине Каргалинского прорыва немного (24,8—27,6; 30,8—54,4; 50,4—53,3; 59,0—60,3; 71,8—73,9 км ниже гидроузла), их спрямление может уменьшить длину реки примерно на 4 км. Расчеты показывают, что в последнем случае сокращение длины устьевого участка приведет к понижению отметок выработанного продольного профиля дна и паводочных уровней на 1,0—1,2 м. Оказалось, что при учете современных характеристик стока воды и наносов и уменьшении длины Каргалинского прорыва на 4 км эквивалентный профиль и продольный профиль дна за 1980 г. практически совпадают. Учитывая, что сток реки в дельту будет постепенно уменьшаться, необходимо предусмотреть дополнительное уменьшение длины реки на 6—7 км, чтобы не допустить однонаправленных деформаций русла. Этого можно достичь с помощью крупномасштабных спрямлений макроформ русла Каргалинского прорыва на участке 28—60 км от гидроузла. Подобные работы могут сократить длину устьевого участка реки на 8,5—12 км.

И. П. Беляев [1963] в качестве одного из путей решения основной проблемы низовьев Терека назвал перераспределение стока реки по пространству дельты в целях снижения темпов вертикальных русловых деформаций в дельтовых водотоках. Можно считать, что это предложение соответствует случаю последовательного уменьшения стока воды, поступающего в русло Каргалинского прорыва.

Уменьшение водоносности Каргалинского прорыва вызовет очень большое (на 1,0—1,5 м) возрастание отметок эквивалентного профиля дна и, следовательно, паводочных уровней. В перспективе планируется дальнейшее расширение площади орошаемых земель, что будет сопровождаться увеличением повторяемости меженных расходов воды и повышением отметок дна по трассе русла Каргалинского прорыва. Поэтому проекты регулирования стока и русла в низовьях Терека должны учитывать возможное изменение положения эквивалентного профиля дна и свободной поверхности.

Аналогично на положение эквивалентного профиля воздействует уменьшение водности реки в паводочный период, если сбросить часть максимального стока в плавни и пески. Такая мера станет, конечно, примером нерационального использования природных ресурсов, кроме того, нужно учитывать отсутствие в верхней части дельты естественных аккумулялирующих емкостей. Поэтому принятие такого плана защиты низовьев Терека от наводнений потребует создания крупных искусственных водоемов.

Противопаводочные водохранилища, срезающие пики паводков, могут повлиять на повторяемость расходов воды в большей степени, чем на объем стока. Одновременно может изменяться и режим транспорта речных наносов. Некоторое повышение отметок профиля дна вследствие увеличения доли небольших расходов компенсируется их снижением вследствие уменьшения мутности в нижнем бьефе водохранилищ. Поэтому суммарное воздействие противопаводочных водохранилищ на эквивалентный профиль русла, как показали расчеты, оказывается несущественным.

Таким образом, защита дельты р. Терека от наводнений в условиях ожидаемого изменения факторов, определяющих развитие русла, может быть эффективной, если будут проведены следующие мероприятия: 1) длина русла сокращена на 10—11 км для приведения современного продольного профиля дна на устьевом участке к эквивалентному при ожидаемых гидрологических условиях; 2) сооружено противопаводочное водохранилище, позволяющее уменьшить максимальные расходы воды 1%-ной обеспеченности до $1000 \text{ м}^3/\text{с}$; 3) высота противопаводочных валов будет доведена до отметок, превышающих на 0,5 м горизонты воды при расходе $1000 \text{ м}^3/\text{с}$.

10.3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ «НОВОЙ» ДЕЛЬТЫ Р. ТЕРЕКА

Как показало исследование «новой» дельты р. Терека (см. гл. 6), направленность и интенсивность процессов ее развития определяются соотношением стока наносов и мощности морского волнения.

Предположения о том, что морфометрия и морфология дельты выдвигения или устьевого бара связаны с относительным влиянием речных и морских факторов, были высказаны давно. Количественно эта идея впервые была воплощена в работе

Л. Райта и Дж. Колемана [Wright, Coleman, 1973]. Анализируя форму морского края ряда дельт мира, эти авторы предложили количественный критерий, названный ими «индексом речного расхода» и равный отношению удельного (на единицу ширины морского края дельты) расхода воды к удельному потоку энергии ветрового волнения q/E .

Однако позже [Михайлов и др., 1977, 1986; Полонский, 1979] было показано, что более оправданно использовать не удельный расход воды, а удельный расход наносов. В этом случае связь «критерия взаимодействия реки и моря» r/E и морфометрии морского края дельты оказывается более тесной, поскольку именно сток наносов — главный фактор, формирующий дельту выдвигания.

Объединив концепцию «критерия взаимодействия реки и моря» с анализом уравнений баланса наносов в устьях рек вида (6.1) и (6.2), можно разработать метод расчета выдвигания или деградации «новой» дельты р. Терека. Будем считать при этом, что суммарное воздействие волнения на конус выноса реки заключается в волновом разрушении речных отложений и уносе части наносов вдоль берега за пределы дельты. Это означает, что член W_b в уравнениях (6.1) и (6.2) должен иметь знак «минус». Возьмем за основу уравнение (6.2). Оно не включает сток мелких речных наносов и практически не поддающийся учету унос мелких наносов на большие глубины, что и позволяет сопоставить поступление, унос и отложение наносов крупных фракций.

Выразим в уравнении (6.2) величину поступления речных наносов крупных фракций W'_p и унос волнением W_b через удельные объемные расходы крупных наносов: $W'_p = R'\Delta t = r' L_{мкд} \Delta t$ и $W_b = R_b \Delta t = r_b L_{мкд} \Delta t$. Предположим, что унос наносов с единицы длины морского края дельты пропорционален удельному потоку энергии ветрового волнения: $r_b = aE$. Тогда уравнение (6.1) можно записать в виде

$$\Delta W'_{кв} = r' L_{мкд} \Delta t - aEL_{мкд} \Delta t \quad (10.14)$$

или

$$\frac{\Delta W'_{кв}}{EL_{мкд} \Delta t} = \frac{r'}{E} - a, \quad (10.15)$$

где $r'/E = \lambda'$ и есть размерный «критерий взаимодействия реки и моря» для крупных наносов.

Аналогично можно получить формально и размерный «критерий взаимодействия реки и моря» для наносов всех фракций: $\lambda = r/E$. Размерность этих критериев $m^3/Дж$.

Физически, однако, более обоснованно использовать безразмерный критерий взаимодействия реки и моря:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda'}{a} = \frac{r'}{aE},$$

где числитель — удельный расход приносимых рекой крупных наносов, знаменатель — удельный расход наносов, уносимых волнением.

Разделим все члены уравнения (10.15) на a :

$$\frac{\Delta W'_{\text{кв}}}{aEL_{\text{мкд}}\Delta t} = \lambda_0 - 1. \quad (10.16)$$

Возможны три случая: дельта выдвигается в море ($\Delta W'_{\text{кв}} > 0$), дельта стабильна ($\Delta W'_{\text{кв}} = 0$) и дельта деградирует ($\Delta W'_{\text{кв}} < 0$). В первом случае $\lambda_0 > 1$, во втором $\lambda_0 = 1$, в третьем $\lambda_0 < 1$.

Измерения стока наносов (всех и только крупных фракций), объема той части конуса выноса, которая сложена крупными наносами, и данные об интенсивности волнения в устье р. Терека (см. гл. 6) позволили установить эмпирическую связь вида (10.15) для крупных фракций наносов (коэффициент корреляции 0,985):

$$\frac{\Delta W'_{\text{кв}}}{EL_{\text{мкд}}\Delta t} = \frac{0,992r'}{E} - 0,222 \cdot 10^{-6}. \quad (10.17)$$

Таким образом, множитель a для условий «новой» дельты р. Терека равен $0,222 \cdot 10^{-6}$.

Поскольку между $\Delta W'_{\text{кв}}$ и $\Delta W_{\text{кв}}$ имеется определенная связь (см. табл. 18), правомочно найти аналогичную эмпирическую зависимость и для наносов всех фракций и всего конуса выноса. Такая зависимость (коэффициент корреляции 0,976) оказалась следующей:

$$\frac{\Delta W_{\text{кв}}}{EL_{\text{мкд}}\Delta t} = 0,478 \frac{r}{E} - 0,482 \cdot 10^{-6}. \quad (10.18)$$

Зависимости (10.17) и (10.18) имеют расчетное значение и позволяют определить по известным r , r' и E не только тенденцию развития дельты, но и величину нарастания (или размыва) конуса выноса ($\Delta W'_{\text{кв}}$ и $\Delta W_{\text{кв}}$). Метод проверен на материалах по «новой» дельте р. Терека за 1973—1987 гг. и показал удовлетворительные результаты.

По разработанному методу рассчитаны возможные изменения объема конуса выноса р. Терека и некоторых морфометрических характеристик дельты в будущем при разных сочетаниях взаимодействия речных (сток наносов) и морских (волнение) факторов. Уровень моря принимался неизменным и равным современному).

Расчет сделан для следующих вариантов: $r = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (современные условия, в среднем за 1984—1987 гг.), $r = 2 \cdot 10^{-6}$, $r = 10 \cdot 10^{-6}$, $r = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $r' = 0,59 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (современные условия), $r' = 0,2 \cdot 10^{-6}$, $r' = 1 \cdot 10^{-6}$, $r' = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $E = 4,23 \text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{с})$ (средние условия для периода 1984—1987 гг.), $E = 3$, $E = 6 \text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{с})$; $\Delta t = 1$, $\Delta t = 2$, $\Delta t = 3$, $\Delta t = 5$, $\Delta t = 10$ годам. Принято, что длина морского края дельты сохранится на современном уровне ($\sim 6750 \text{ м}$). Таким образом, приняты во внимание значения стока наносов и волнения больше или меньше современных.

Результаты расчета (табл. 45, рис. 34) показали, что направленность и интенсивность развития дельты р. Терека будут зависеть от соотношения стока наносов и энергии волнения. Если величины

Таблица 45

Приращения объема конуса выноса р. Терекa при различных величинах
удельного стока наносов и энергии волнения

Интервал времени, годы	E, Дж/(м с)	Весь объем конуса выноса (10^3 м^3) для разных r ($10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$)					Часть конуса выноса, сложенная крупными наносами (10^3 м^3), для разных r' ($10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$)				
		2	5,6	10	20	0,2	0,59	1	2		
$\Delta t = 1$	3	-104	262	709	1725	-98,2	-15,9	70,2	282		
	4,23	-230	136	583	1599	-156	-73,8	12,6	224		
	6	-412	-46	402	1417	-239	-157	-68,9	140		
$\Delta t = 2$	3	-208	524	1418	3450	-196	-31,8	140	564		
	4,23	-460	272	1166	3198	-312	-147	25,2	448		
	6	-824	-92	804	2834	-478	-314	-138	280		
$\Delta t = 3$	3	-312	786	2127	5175	-295	-47,7	211	846		
	4,23	-690	408	1749	4797	-468	-221	37,8	672		
	6	-1236	-138	1206	4251	-717	-471	-207	420		
$\Delta t = 5$	3	-520	1310	3545	8625	-491	-79,5	351	1410		
	4,23	-1150	680	2915	7995	-780	-369	63,0	1120		
	6	-2060	-230	2010	7085	-1195	-785	-344	700		
$\Delta t = 10$	3	-1040	2620	7090	17250	-982	-159	702	2820		
	4,23	-2300	1360	5830	15990	-1560	-738	126	2240		
	6	-4120	-460	4020	14170	-2390	-1570	-689	1400		

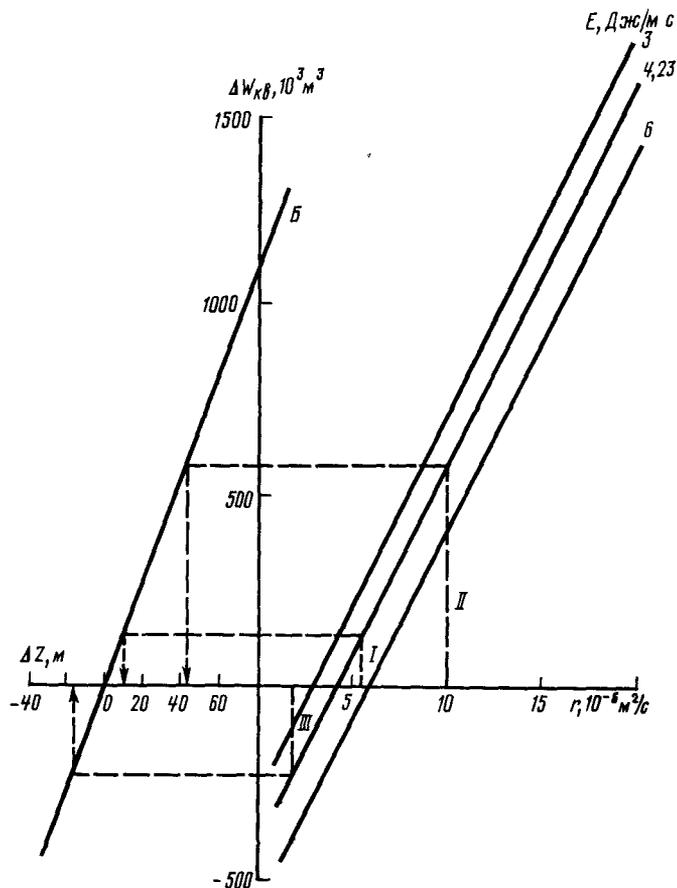


Рис. 34. Номограмма для расчета изменения полного объема конуса выноса (А) и длины «новой» дельты Терека (Б)

I, II, III—варианты расчета

стока наносов и волнения сохраняются в среднем на современном уровне ($r = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ или $R = rL_{\text{мкд}} = 5,6 \cdot 10^{-6} \cdot 6750 \text{ м} = 37,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; годовой сток наносов при этом будет $1,19 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, или $1,43 \cdot 10^6 \text{ т}$; $E = 4,23 \text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{с})$, то дельта реки будет очень медленно выдвигаться, увеличивая объем конуса выноса на $135,8 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$ ($0,136 \cdot 10^{-3} \text{ км}^3/\text{год}$) (вариант I, см. рис. 34).

При большем стоке наносов и более слабом волнении дельта будет выдвигаться интенсивнее, при меньшем стоке наносов и более сильном волнении—медленнее. Более того, при некоторых значениях стока наносов и волнения дельта будет размываться и отступать. Результаты всех вариантных расчетов приведены в табл. 45. Если, например, удельный расход наносов увеличится до $10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (а их сток соответственно до $2,13 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$), то

при средней величине потока энергии ветрового волнения $4,23 \text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{с})$ годовое приращение объема конуса выноса составит $583 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ (вариант II, см. рис. 34). Если же удельный расход наносов снизится до $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (а их сток соответственно до $0,4 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$), то при тех же волновых условиях объем конуса выноса будет ежегодно уменьшаться на $230 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ и дельта деградировать (вариант III, см. рис. 34).

Для перехода от рассчитанных указанным способом изменений объема конуса выноса ($W_{\text{кв}}$) к изменениям длины ($L_{\text{д}}$) и площади дельты ($F_{\text{д}}$) необходимо использовать зависимости между перечисленными характеристиками. Такие зависимости были найдены для «новой» дельты р. Терека, а также для «старой» и «новой» дельт р. Сулака (табл. 46).

Таблица 46

Зависимости между морфометрическими характеристиками дельты выдвигания и конуса выноса

Дельта	Число членов ряда	$F_{\text{д}} = f_1(L_{\text{д}})$	$W_{\text{кв}} = f_2(L_{\text{д}})$	$W_{\text{кв}} = f_3(F_{\text{д}})$
«Старая» дельта р. Сулака	9	$F_{\text{д}} = 2,354 L_{\text{д}}^{1,272}$ ($r = 0,976$)	$W_{\text{кв}} = 0,0175 L_{\text{д}}^{1,630}$ ($r = 0,975$)	$W_{\text{кв}} = 0,006 F_{\text{д}}^{1,272}$ ($r = 0,992$)
«Новая» дельта р. Сулака	9	$F_{\text{д}} = 2,083 L_{\text{д}}^{1,300}$ ($r = 0,991$)	$W_{\text{кв}} = 0,0145 L_{\text{д}}^{1,669}$ ($r = 0,990$)	$W_{\text{кв}} = 0,0056 F_{\text{д}}^{1,283}$ ($r = 0,999$)*
«Новая» дельта р. Терека	26	$F_{\text{д}} = 1,906 L_{\text{д}}^{1,412}$ ($r = 0,952$)	$W_{\text{кв}} = 0,0073 L_{\text{д}}^{1,540}$ ($r = 0,921$)	$W_{\text{кв}} = 0,0036 F_{\text{д}}^{1,106}$ ($r = 0,981$)

Примечание. Коэффициенты корреляции (r) относятся к связям между логарифмами характеристик.

* Коэффициент корреляции близок к 1 в связи с тем, что объем конуса выноса («новая» дельта Сулака) для некоторых лет определен по приближенной связи $W_{\text{кв}} = f_3(F_{\text{д}})$.

Расчеты показали, что при средних величинах стока наносов и волнения возможно выдвигание дельты с интенсивностью около $10 \text{ м}/\text{год}$ (см. рис. 34). Приращения длины дельты при повышенном и пониженном стоке наносов составят соответственно $42 \text{ м}/\text{год}$ (интенсивное выдвигание дельты) и $-18 \text{ м}/\text{год}$ (размыв дельты). Эти величины $\pm \Delta L_{\text{д}}$ практически экстремальные. Фактические приращения дельты должны быть существенно меньше, что свидетельствует о том, что значительных изменений длины «новой» дельты Терека в ближайшее время ожидать не следует.

Заметим, что прогностические оценки базировались на данных по состоянию «новой» дельты р. Терека на конец 1987 г. Прошедшие за три года изменения показали правдоподобность прогностических оценок.

Расчеты отвечают условию в целом стабильного положения уровня моря, что соответствует наиболее вероятному прогнозу на ближайшие $10-20$ лет (см. разд. 10.1). В случае существенного повышения уровня моря размыв «новой» дельты активизируется

и ее большая часть будет затоплена. Значительное снижение уровня моря ускорит выдвигание дельты в море.

Обнаруженные в последние годы процессы активного зарастания лагун и кос, по-видимому, будут продолжаться. В то же время в центральных частях лагун могут сохраниться довольно большие глубины.

10.4. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДЕЛЬТЫ Р. СУЛАКА

Существенное нарушение баланса наносов в дельте р. Сулака, вызванное значительным сокращением поступления речных наносов после сооружения Чиркейской ГЭС, предопределяет большую вероятность прекращения дальнейшего выдвигания «новой» дельты Сулака в море и начала ее общего размыва (см. гл. 3, 9).

Из-за недостатка данных измерений не удалось получить расчетные зависимости между изменившимся стоком наносов и изменением объема конуса выноса р. Сулака. Если такие зависимости в будущем удастся получить, то для расчета изменения длины и площади «новой» дельты Сулака по рассчитанным изменениям объема конуса выноса можно будет использовать эмпирические связи (см. табл. 46).

В ближайшие годы (до 2000 г.) следует ожидать продолжения размыва морского края как «старой», так и «новой» дельты Сулака. Сулакская коса, подпитываемая продуктами размыва «старой» дельты, в целом сохранит размеры и форму. Пролив между морем и Сулакской бухтой может еще больше сузиться, но полного его перекрытия, по-видимому, не произойдет, так как некоторое сечение должно сохраняться для обеспечения водообмена при сгонно-нагонных явлениях. Лагуны в «новой» дельте Сулака будут зарастать.

В случае дальнейшего повышения уровня моря будет продолжаться процесс расширения лагун в «новой» дельте, будет происходить подтопление берегов Сулакской бухты и активизируются размывы морского края как «старой», так и «новой» дельты Сулака.

Р

т

т

т

т

т

т

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При решении проблем рационального использования и охраны природных ресурсов Каспийского моря и прилегающих к нему территорий одним из ключевых вопросов становится судьба устьевых областей рек, среди которых важное место занимают устья рек Терека и Сулака. Эти природные объекты неразрывно связаны с Каспием, с одной стороны влияя на морфологию и режим прибрежной зоны моря, а с другой — находясь под сильным влиянием самого моря, и прежде всего значительных колебаний его уровня. В особенностях режима устьев рек Терека и Сулака есть немало сходного.

Во-первых, у обеих рек похожий паводочный режим и в целом близкие величины стока воды и наносов (в естественных условиях 8,9 км³/год и 16,3 млн т/год у Терека и 4,5 км³/год и 13,2 млн т/год у Сулака).

Во-вторых, сток этих рек в последние десятилетия заметно уменьшился вследствие хозяйственной деятельности в речных бассейнах. Многолетние величины стока воды и наносов, поступающих к вершинам дельт, составляют с учетом антропогенного уменьшения для Терека 8,4 км³/год и 14,2 млн т/год, для Сулака 4,4 км³/год и 13,2 млн т/год (до сооружения в 1974 г. Чиркейской ГЭС) и 4,0 км³/год и 1,64 млн т/год (после 1974 г.). К 2000 г. сток воды в устьях Терека и Сулака может сократиться соответственно до 5,9 и 3 км³/год.

В-третьих, Терек и Сулак впадают в замкнутый бессточный водоем, основная отличительная черта режима которого — значительные многолетние колебания фонового уровня. Уровень моря, значительно влияющий на режим устьев рек Терека и Сулака, имел максимальные за последние, по крайней мере 500 лет, отметки во второй половине XVIII — начале XIX в. (–24 ÷ –25 м).

Затем уровень несколько снизился и стоял на отметках –26 ÷ –26,5 м. абс. Позже уровень резко упал с –26 в 1929 г. до –28 м. абс. в 1957 г. К 1977 г. уровень упал еще на 1 м и достиг самого низкого за последние 500 лет положения (–29 м. абс). С 1978 г. уровень моря неуклонно повышается, достигнув отметки –28 в 1985 г. и –27 м. абс. в 1991 г., т. е. поднялся приблизительно на 1,7 м.

В-четвертых, морфология и режим прибрежной зоны моря, прилегающей к устьям обеих рек в настоящее время, довольно сходны: относительно приглубым взморьям свойственны слабые или умеренные величины энергии морского волнения, отсутствие приливов и небольшие сгонно-нагонные колебания уровня.

Несмотря на перечисленные сходства, в устьях рек Терека и Сулака сформировались совершенно различные и по размеру и по строению дельты. Современная дельта р. Терека — одна из крупнейших в России (ее площадь 8900 км²). Современная же дельта р. Сулака невелика (ее площадь всего около 70 км²). Существенно различается и строение этих дельт. Дельта Терека — это сложный комплекс крупных разновозрастных наложенных (т. е. сформировавшихся на поверхности уже существовавшей ранее дельты) частных дельт. Дельта Сулака — это система небольших по размеру причлененных (т. е. сформировавшихся сбоку от уже существующей дельты) частных дельт (дельтовых лопастей). Эти различия дельт в основном объясняются особенностями истории их формирования.

Дельтовая равнина Терека сформировалась в мелководном морском заливе, отделенном от моря Аграханским полуостровом. За последние 500 лет в дельте Терека произошло семь циклов формирования частных наложенно-причлененных дельт (каждый раз с новым магистральным рукавом и его гидрографической сетью). Каждый цикл включал прорыв вод Терека в новом направлении в пониженную часть дельты, образование обширных разливов, зарождение и развитие новой гидрографической сети, выдвигание русла в морской залив, отмирание сети водотоков после нового прорыва.

Последний цикл начался в 1914 г. в результате катастрофического Каргалинского прорыва Терека в юго-восточную часть дельты. Этот цикл пока не завершен и, более того, прерван искусственным выводом вод реки по прорези через Аграханский полуостров на открытое побережье Среднего Каспия.

История развития современного магистрального рукава Терека — Каргалинского прорыва включает четыре периода:

I — озерно-плавневый (1914—1939 гг.);

II — формирование многорукавной, первоначально наложенной, а затем причлененной дельты выполнения (1940—1962 гг.);

III — формирование малорукавной наложенно-причлененной дельты (1963—1976 гг.);

IV — формирование малорукавной причлененной дельты выдвигания («новой» дельты Терека) и стабилизация основного русла (с 1977 г.).

В первый период в дельте Терека преобладала крупномасштабная аккумуляция транзитных наносов реки и продуктов размыва грав между озерами, во второй период преобладала аккумуляция наносов в наложенной дельте, в третий период — в причлененной дельте Аликазгана в Аграханском заливе. В четвертый период вначале преобладал регрессивный (попятный) размыв русла, вызванный искусственным сокращением его длины и частично понижением уровня моря, а затем — аккумуляция, связанная с повышением уровня моря.

Формирование «новой» дельты Терека на открытом морском побережье включает три этапа:

1) образование первичной баровой отмели после прорыва перемычки прорези в 1973 г. (к концу этапа размеры отмели достигли 0,67 км и 2,3 км²);

2) волновая переработка баровой отмели в условиях перекрытой прорези (1 ноября 1973 г.—10 августа 1977 г.) (в это время продолжалось формирование дельты выполнения в Аграханском заливе);

3) продолжение формирования дельты выдвигания начиная с 11 августа 1977 г., после нового открытия прорези (к сентябрю 1987 г. длина «новой» дельты достигла 1,4 км, площадь 3,2 км²). В связи с повышением уровня моря в последние годы площадь «новой» дельты сократилась (в основном из-за затопления ее периферийных частей и увеличения площади лагун); начался размыв ее морского края.

Сток Терека в современных условиях рассредоточен по дельте следующим образом: в нижний бьеф регулирующего Каргалинского гидроузла (т. е. в исток магистрального рукава) поступает 60% стока воды и 66% стока наносов реки в вершине дельты (с. Степное); в низовьях магистрального рукава (г/п Аликазган) проходит 50% стока воды и 55% стока наносов; в море в районе «новой» дельты в период 1980—1987 гг. попадало лишь 30% стока воды и 20% стока наносов (в связи с отвлечением стока в Кубякинский канал); после 1987 г., с заилением Кубякинского канала, основная часть стока воды проходит по основному руслу Терека.

Современная дельта Сулака зародилась в начале XIX в., после того как при повышенных уровнях моря произошел прорыв вод реки через пересыпь, отделявшую Аграханский залив, куда ранее впадал Сулак, от моря. В более древние времена Сулак, по-видимому, неоднократно попеременно впадал в разных местах в море и в залив, о чем свидетельствуют многочисленные следы старых, заброшенных русел реки. Древние дельты Сулака в Среднем Каспии, оставаясь периодически без питающих их вод и наносов реки, размывались морским волнением и поставляли продукты размыва для наращивания Аграханского полуострова.

Современная дельта Сулака развивалась циклично путем последовательного возникновения, формирования и отмирания отдельных дельтовых лопастей. I цикл—это формирование «пионерной» клювовидной дельты (1800—1920 гг.), достигшей к концу цикла длины 7,3 км и площади 25 км². II цикл (1920—1929 гг.) начался после естественного прорыва в 1920 г. вод реки недалеко от моря через левую устьевую косу в северо-восточном направлении. Старое русло в устьевой части было заблокировано. К концу цикла длина дельты по руслу достигла 8,9 км, ее площадь составляла 32,8 км². III циклу (1929—1957 гг.) положил начало новый прорыв вод реки в 1929 г. по небольшой искусственно прорытой канаве через узкую левую устьевую косу непосредственно восточнее пос. Сулак. Новая дельтовая лопасть быстро выдвинулась на мелководье в северном направлении, и вся дельта к концу цикла достигла длины по руслу 13 км и площади 67 км². Предыдущий дельтовый выступ размывался морским волнением. IV цикл развития дельты Сулака начался после искусственного вывода вод реки по прорези в юго-восточном

направлении в августе 1957 г. Старое русло выше головы прорези было перекрыто дамбой. В устье прорези началось формирование новой дельтовой лопасти. Продукты волнового размыва старой части дельты сформировали к северу от дельты Сулакскую косу, постепенно почти полностью перекрывающую Сулакскую бухту — залив между дельтой и коренным берегом. К 1987 г. вся дельта Сулака достигла длины по руслу 7,8 км и площади 72 км².

Дельта, сформировавшаяся в 1800—1957 гг., получила название «старой» дельты Сулака, небольшая дельта, возникшая в устье прорези начиная с 1957 г., — «новой» дельты Сулака. «Новая» дельта Сулака выдвинулась в море к 1982 г. на 1,9 км и достигла площади 5,6 км².

В связи с резким сокращением стока наносов Сулака после сооружения в 1974 г. Чиркейской ГЭС и повышением уровня моря выдвигание «новой» дельты Сулака сначала замедлилось, а затем сменилось размывом. Повышение уровня моря привело в последние годы к подтоплению низких северных участков «старой» дельты Сулака, активизации волнового размыва ее восточного берега, сокращению общей площади дельты, возникновению лагун в районе «новой» дельты.

Учитывая, что прорыв Сулака в 1929 г. был стимулирован человеком, формирование после этого вытянутой на север длинной дельтовой лопасти должно быть признано аномальным и не может служить аналогом развития «новой» дельты Терека, как иногда считают. Некоторым аналогом «новой» дельты Терека может быть признана лишь «новая» дельта Сулака.

Русловые деформации и гидрологический режим в дельтах Терека и Сулака в будущем будут в основном зависеть от антропогенных изменений стока этих рек и тенденции и масштаба изменения фонового уровня моря.

Дальнейший подъем уровня моря приведет к крупномасштабной аккумуляции наносов и повышению отметок дна и уровня воды на устьевых участках Терека и Сулака. Вблизи моря русло будет повышаться приблизительно параллельно самому себе.

Распространение подпора на устьевой участок Терека приведет к уменьшению пропускной способности русла, усилению опасности не только сильных размывов, но и прорыва русла в сторону южной части Аграханского залива с последующим выходом речных вод в море по Мехтебскому сбросу. Сохраняется опасность прорыва правого берега русла Терека и в районе вершины дельты (верхняя часть излучины выше головного сооружения канала им. Держинского).

В устье Сулака при значительном повышении уровня моря создается опасность прорыва вод реки в сторону Мехтебского озера с последующим выходом вод в море по Мехтебскому сбросу.

Процессы, происходящие в устьевых областях Терека и Сулака (в особенности связанные с повышением уровня Каспия), могут потребовать вмешательства человека. Для разработки мероприятий по предотвращению возможных прорывов и наводнений,

а также по рациональному использованию и охране природных ресурсов дельт этих рек проводимые здесь наблюдения и исследования необходимо продолжить и расширить.

Во-первых, должны быть восстановлены в полной мере наблюдения на сети гидрологических постов в дельтах Терека и Сулака (нижний бьеф Каргалинского гидроузла, Кутан-Аул, Тамаза-Тюбе, Аликазган, Дамба, пос. Сулак). Во-вторых, необходима организация систематических съемок русла Каргалинского прорыва и Сулака, а также «новых» дельт Терека и Сулака, гидрометрических работ в водотоках дельт и на устьевом взморье. В-третьих, большую ценность могли бы иметь систематические аэрокосмические съемки устьевых областей. Наконец, для организации и проведения исследований и обобщения их результатов необходима координация работ, ведущихся различными организациями.

ЛИТЕРАТУРА

Абальянц С. Х. Устойчивые и переходные режимы в искусственных руслах. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 240 с.

Азимов С. А. Формирование пионерных дельт и их влияние на гидрологический режим прибрежной зоны моря: Автореф. дис. ...канд. геогр. наук. М., 1980. 19 с.

Азимов С. А., Керимов А. А., Штейнман Б. С. Процессы дельтообразования рек западного побережья Каспийского моря и вопросы рационального использования природных ресурсов устьевых областей. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 104 с.

Алексеевский Н. И. Основные особенности руслового процесса в низовьях р. Терек // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 1980. № 6. С. 73—77.

Алексеевский Н. И. Транспорт влеко-мых наносов при развитой структуре руслового рельефа // Метеорология и гидрология. 1990. № 9. С. 100—105.

Алексеевский Н. И., Михайлов В. Н., Сидорчук А. Ю. Формирование Каргалинское прорыва р. Терек // Палеогеография Каспийского и Аральского морей в кайнозое. М.: Изд-во МГУ, 1983. Ч. 1. С. 126—134.

Алексеевский Н. И., Михайлов В. Н., Сидорчук А. Ю. Гидролого-морфометрическое обоснование оптимального регулирования русла в низовьях р. Терек // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 1985. № 4. С. 99—105.

Алексеевский Н. И., Михайлов В. Н., Сидорчук А. Ю. Процессы дельтообразования в устьевой области Терека // Вод. ресурсы. 1987. № 5. С. 123—128.

Алексеевский Н. И., Сидорчук А. Ю. Морфология и динамика рельефа дна в нижнем течении Терека // Земельные и водные ресурсы. Противозеронозная защита и регулирование русел. М.: Изд-во МГУ. 1990. С. 87—95.

Байдин С. С. Стадийность развития устьевой области реки // Тр. ГОИН. 1971. Вып. 104. С. 5—30.

Байдин С. С. Возможное будущее устьевых областей Терека, Волги и Ура-

ла // Тр. ГОИН. 1976. Вып. 129. С. 90—118.

Байдин С. С., Скрытунцов Н. А., Штейнман Б. С., Ган Г. Н. Гидрология устьевых областей рек Терека и Сулака. М.: Гидрометеиздат, 1971. 198 с.

Беляев И. П. Гидрология дельты Терека. М.: Гидрометеиздат, 1963. 205 с.

Блатов А. С., Ведев Д. Л., Косарев А. Н. О сейшах в Каспийском море // Метеорология и гидрология. 1990. № 8. С. 109—114.

Варущенко А. Н. Статистика выраженных в рельефе четвертичных береговых линий Каспия, его площади и объемы при позднеплейстоценовых трансгрессиях и регрессиях // Палеогеография Каспийского и Азовского морей в кайнозое. М.: Изд-во МГУ, 1983. Ч. 1. С. 97—109.

Ган Г. Н. Влияние падения уровня моря и спрямления русла на гидрологический режим низовья реки (на примере Сулака) // Тр. ГОИН. 1969. Вып. 98. С. 41—48.

Гидрологический справочник морей СССР. Т. II. Каспийское море. Вып. IV. Редиздат ЦУЕГМС, 1936. 821 с.

Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 374 с.

Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 144 с.

Гришин Н. Н., Дебольский В. К., Красножон Г. Ф., Котков В. М., Семенов С. С. О начальной стадии формирования устьевых участка реки (на примере р. Терек) // Вод. ресурсы. 1975. № 6. С. 119—125.

Демин Д. З. Пути рыбохозяйственной реконструкции гидрографической структуры дельты р. Терек в условиях пониженного уровня Каспийского моря // Проблемы Каспийского моря. Баку: Изд-во АН АзССР, 1963. С. 170—175.

Диваков И. В. Исследования стоковой струи на взморье Терека // Гидрофизика Северного Каспия. М.: Наука, 1985. С. 161—170.

- Диваков И. В. Трансформация стоковой струи в плане на устьевом взморье открытого типа: Автореф. дис. ...канд. геогр. наук. М., 1988. 23 с.
- Динамика наносов в реках и водохранилищах. М.: Стройиздат, 1978. 248 с.
- Ефимов В. В., Куликов Е. А., Рабинович А. Б., Файн И. В. Волны в пограничных областях океана. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 280 с.
- Ещенко Л. А., Иванов А. Н. Опыт измерения характеристик волнового и речного потоков на предустьевом взморье // Информационное письмо № 5 (81). М.: ГОИН, 1981. С. 32—36.
- Казакевич А. В. Исправление уровней наблюдений на Каспийском море // Тр. ГОИН. 1985. Вып. 163. С. 23—27.
- Караушев А. В. Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 271 с.
- Каспийское море. Гидрология и гидрохимия / Отв. ред. С. С. Байдин, А. Н. Косарев. М.: Наука, 1986. 263 с.
- Клеацова Н. Д. Течения у западного побережья Среднего и Южного Каспия // Сб. работ Бакинской гидрометеобсерватории. Баку, 1968. Вып. 4. С. 151—159.
- Клиге Р. К. Уровень океана в геологическом прошлом. М.: Наука, 1980. 111 с.
- Клиге Р. К. Изменения водного режима Каспийского моря в кайнозой // Палеогеография Каспийского и Азовского морей в кайнозой. М.: Изд-во МГУ, 1983. Ч. 1. С. 77—84.
- Косарев А. Н. Гидрология Каспийского и Аральского морей. М.: Изд-во МГУ, 1975. 272 с.
- Леонтьев О. К. Эволюция береговой линии Северо-Дагестанского побережья Каспийского моря // Изв. ВГО. 1951. Т. 83, вып. 4. С. 353—363.
- Леонтьев О. К., Халилов А. И., Кудусов Э. А., Мехтиев Н. Н. О последних изменениях береговой линии в устье Сулака // Изв. АН АзССР. Сер. геол. геогр. наук. 1965. № 6. С. 97—103.
- Леонтьев О. К., Лукьянова С. А., Соловьева Г. Д. Динамика морского края дельты Сулака // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 1987. С. 83—87.
- Маккаев Н. И. Русло реки и эрозии в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
- Матушевский Г. В. Расчет высот энергосущих волн, определяющих вдольбереговое движение наносов // Тр. ГОИН. 1979. Вып. 144. С. 115—117.
- Михайлов В. Н. Динамика потока и русла в неприливных устьях рек. М.: Гидрометеоздат, 1971. 260 с.
- Михайлов В. Н., Алексеевский Н. И. Теоретические схемы русловых перестроений и их применение к дельте Терека // Волные ресурсы бассейна р. Терек и их использование. Ростов н/Д, 1983. С. 79—91.
- Михайлов В. Н., Иванов А. Н., Лютиков А. В., Полонский В. Ф. Морской край дельты как результат взаимодействия реки и моря // Береговая зона моря. М.: Наука, 1981. С. 26—32.
- Михайлов В. Н., Михайлова М. В., Сидорчук А. Ю., Красножон Г. Ф., Полонский В. Ф. История формирования новой дельты Терека и ее вероятное дальнейшее развитие // Водные ресурсы бассейна реки Терек и их использование. Ростов н/Д, 1983. С. 32—51.
- Михайлов В. Н., Rogov M. M., Макарова Т. А., Полонский В. Ф. Динамика гидрографической сети неприливных устьев рек. М.: Гидрометеоздат, 1977. 294 с.
- Михайлов В. Н., Rogov M. M., Чистяков А. А. Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 280 с.
- Михайлова М. В. Закономерности формирования современных дельт выдвигания Сулака и Терека // Комплексные исследования Северного Каспия. М.: Наука, 1988. С. 70—83.
- Михайлова М. В. Гидролого-морфологические закономерности формирования дельт выдвигания: Автореф. дис. ...канд. геогр. наук. М., 1989. 26 с.
- Первухин М. А. Каспийское побережье от Аграханского залива до Апшерона: Геоморфологический очерк // Учен. зап. МГУ. География. 1938. Вып. 19. С. 190—248.
- Полонский В. Ф. Возможность расчета основных характеристик устьевых баров и их типизация // Тр. ГОИН. 1979. Вып. 143. С. 132—137.
- Пушин Н. Лоция Каспийского моря. СПб., 1897. 396 с.
- Росинский К. И., Дебольский В. К. Речные наносы. М.: Наука, 1980. 216 с.
- Росинский К. И., Кузьмин И. А. Балансовый метод расчета деформаций dna потока // Тр. Гидропроекта. 1964. Сб. 12. С. 265—271.
- Руководство по расчету параметров ветровых волн. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 134 с.
- Рычагов Г. И. Плейстоценовая история Каспийского моря: Автореф. дис. ...д-ра геогр. наук. 1977. 45 с.
- Чекалина Т. И. Геоморфологическое строение дельты Терека и его влияние на структуру почвенного покрова: Ав-

тореф. дис. ...канд. геогр. наук. М., 1977. 20 с.

Шикломанов И. А. Антропогенные изменения водности рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 302 с.

Шикломанов И. А. Исследование водных ресурсов суши: итоги, проблемы, перспективы. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 152 с.

Шикломанов И. А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 334 с.

Штейнман Б. С., Азимов С. А. Исследование формирования пионерных дельт (на примере устья р. Терек)//Тр. ЗакНИГМИ. 1981. № 78 (84). С. 85-95.

Bowen A. I., Huntley D. A. Waves, long waves and nearshore morphology//Hy-

drodynamics and sedimentation in wave-dominated coastal environments. Mar. Geol. 1984. Vol. 60. P. 1-13.

Crawford W. R., Thomson R. E. Continental shelf waves of diurnal period along Vancouver Island//J. Geophys. Res. 1984. Vol. 87. P. 9516-9522.

Holman R. A., Huntley D. A., Bowen A. I. Infragravity waves in storm conditions//Proc. 16-th Coastal Engineering conf., Hamburg, 1979. V. VI. P. 268-284.

Wright L. D., Coleman J. M. Variations in morphology of major river deltas as function of ocean waves and river discharge regimes//Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geologists. 1973. Vol. 57, N 2. P. 370-398.