

Метод расчета переформирований русел разветвленных на рукава рек при изменении гидрологического режима

А. М. Алабян, кандидат географ. наук А. Ю. Сидорчук

Метод основан на использовании гидролого-морфометрических зависимостей. Входящая в них величина руслоформирующего расхода рассчитывается по методике Н. И. Маккавеева, учитывающей изменение водного режима реки через трансформацию кривой повторяемости расходов воды. Метод учитывает перераспределение расходов воды по рукавам при изменении их морфометрических характеристик. В качестве примера приводится расчет переформирования участка низовьев р. Енисей.

Протяженность рек, разветвленных на рукава, составляет около 35% общей длины рек СССР, для крупных судоходных рек этот процент еще больше. Освоение много рукавных русел и дельт рек для нужд различных отраслей народного хозяйства вызвало необходимость изучения их более сложного, чем у одно рукавных русел, руслового режима.

В настоящее время наиболее разработанным и обоснованным фактическим материалом методом количественной оценки русловых процессов в разветвленных на рукава руслах является метод В. Н. Михайлова [4]. На основе сравнения фактических морфометрических характеристик отдельных рукавов в разветвлении с их «устойчивыми» значениями по системе критериев определяется естественная направленность развития рукавов — тенденция к «активизации» или «отмиранию». В соответствии с условием динамического равновесия узла разветвления «устойчивые» морфометрические характеристики определяются по гидролого-морфометрическим зависимостям, которые связывают фактические значения морфометрических характеристик рукавов данного разветвления со значениями соответствующих им руслоформирующих расходов.

Вследствие принципа ограниченности естественных комплексов М. А. Великанова [1] гидролого-морфометрические зависимости должны учитывать все влияющие на русловый процесс факторы. Однако для конкретного участка речного русла при неизменных ландшафтно-геологических условиях его формирования (в пределах характерного времени прогноза) можно ограничиться одним основным, определяющим фактором — руслоформирующим расходом воды.

Существует несколько методов оценки значения руслоформирующего расхода воды. Они в разной степени физически обоснованы, и выбор метода в общем случае диктуется поставленной задачей. При расчете переформирований русла при изменении гидрологического режима наиболее представительным является метод Н. И. Маккавеева [3].

В рамках этого метода руслоформирующим считается такой интервал расходов воды, при котором в многолетнем разрезе проходит наибольший сток руслоформирующих наносов. Он определяется из всего диапазона расходов воды, разбитого на n i -х интервалов, как интервал расходов воды, соответствующий максимуму произведения $G_i p_i$. Здесь G_i — расход руслоформирующих наносов, соответствующий среднему в интервале расходу воды Q_i , p_i — повторяемость расходов воды i -го интервала. Именно применение руслоформирующего расхода в понимании Н. И. Маккавеева и дает возможность расчета русловых переформирований, вызванных изменением гидрологического режима реки, так как этот метод учитывает влияние гидрологического режима (через

кривую повторяемости расходов воды) на величину руслоформирующего расхода реки. Достоверность результатов применения метода Н. И. Маккавеева для оценки величин расходов воды, наибольшим образом влияющих на морфологию речного русла, на большом эмпирическом материале показана Р. С. Чаловым [7].

На основе вышеизложенного предлагается следующая последовательность расчета морфометрии рукавов разветвленного русла после изменения гидрологического режима:

1. Строится кривая распределения (гистограмма) суточных расходов воды в вершине узла разветвления для условий современного режима реки.

2. Рассчитывается распределение по рукавам расходов воды и руслоформирующих наносов при различных значениях расхода воды в вершине узла разветвления (для середины каждого интервала гистограммы).

3. По максимуму произведения $G_i p_i$ для каждого рукава определяется значение руслоформирующего расхода Q_{ϕ} .

4. Строятся гидролого-морфометрические зависимости вида $x = a_j Q_{\phi}^{b_j} + \alpha_j$, где x — j -я морфометрическая характеристика для каждого рукава (ширина, глубина, площадь живого сечения и т. д.), a_j и b_j — коэффициенты, α_j — стохастическая составляющая зависимости, которая характеризует степень отличия фактических морфометрических характеристик рукавов узла разветвления от их «устойчивых» значений. При этом необходимо, чтобы узел разветвления в целом находился в состоянии динамического равновесия, а не испытывал однонаправленных изменений. Тогда «устойчивые» значения морфометрических характеристик рукавов определяются зависимостями $x = a_j Q_{\phi}^{b_j}$.

5. Строится кривая распределения (гистограмма) суточных расходов воды в вершине узла разветвления при измененном гидрологическом режиме.

6. Определяются значения руслоформирующих расходов воды для каждого из рукавов узла разветвления при измененном гидрологическом режиме.

7. По зависимостям между «устойчивыми» морфометрическими характеристиками и руслоформирующими расходами воды рассчитываются новые геометрические параметры рукавов узла разветвления.

8. Для измененных морфометрических характеристик рукавов рассчитывается новое распределение расходов воды и руслоформирующих наносов по рукавам.

Операции 6—8 циклически повторяются до тех пор, пока значения морфометрических характеристик не стабилизируются и морфометрия узла разветвления не достигнет нового состояния динамического равновесия в условиях измененного гидрологического режима.

Изложенный алгоритм реализован в виде программы на языке ФОРТРАН-ДУБНА для ЭВМ БЭСМ-6 на ВЦ МГУ.

В качестве примера приведем расчет для изменения морфологии основного узла разветвления в восточной части дельты Енисея в условиях планируемого регулирования стока этой реки при создании Средне-Енисейского водохранилища на Енисее ниже владения Ангары и Туруханского водохранилища на Нижней Тунгуске [6].

По многолетним данным о ежедневных расходах воды по водопосту Игарка для низовьев Енисея построена кривая повторяемости среднесуточных расходов воды для естественных условий. Для условий зарегулированного стока повторяемость суточных расходов рассчитана на основе анализа трансформации гидрографов лет различной водности.

После зарегулирования произойдет значительное перераспределение стока в пользу высокой межени, при этом повторяемость расходов воды, поступающих в восточную часть дельты, больших 30 тыс. м³/с, резко падает, а значения, превышающие 100 тыс. м³/с, могут вообще не рассматриваться из-за чрезвычайно низкой (менее 0,1%) повторяемости (см. табл. 1).

Таблица 1
Рассчитанное распределение расходов воды по рукавам дельты Енисея

| | Q ₀ | | | | | | | | |
|---|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 15000 | 25000 | 35000 | 45000 | 55000 | 65000 | 75000 | 85000 | 95000 |
| <i>Естественные условия</i> | | | | | | | | | |
| <i>P</i> | 0,218 | 0,072 | 0,030 | 0,022 | 0,020 | 0,018 | 0,015 | 0,013 | 0,007 |
| <i>Q</i> ₁ | 1180 | 2570 | 3730 | 5070 | 5880 | 6980 | 7820 | 7910 | 8700 |
| <i>Q</i> ₂ | 3640 | 4970 | 6860 | 8360 | 11800 | 16100 | 19400 | 22800 | 27200 |
| <i>Q</i> ₃ | 10200 | 17500 | 24400 | 31600 | 37400 | 42000 | 47700 | 54300 | 59000 |
| <i>Q</i> ₄ | 4820 | 7540 | 10600 | 13400 | 17600 | 23000 | 27300 | 30700 | 36000 |
| <i>Q</i> ₅ | 2120 | 4110 | 6020 | 8040 | 9430 | 10500 | 11400 | 13500 | 15200 |
| <i>Q</i> ₆ | 8060 | 13300 | 18400 | 23500 | 27900 | 31500 | 36300 | 40800 | 43900 |
| <i>Q</i> ₇ | 6940 | 11700 | 16600 | 21500 | 27100 | 33500 | 38600 | 44200 | 51100 |
| <i>Q</i> ₈ | 2970 | 4910 | 6760 | 8680 | 10400 | 12200 | 13800 | 15700 | 17500 |
| <i>Q</i> ₉ | 5090 | 8430 | 11600 | 14900 | 17500 | 19300 | 22500 | 25100 | 26400 |
| <i>Q</i> ₁₀ | 3220 | 5150 | 6980 | 8870 | 10700 | 12100 | 15100 | 17700 | 20700 |
| <i>Q</i> ₁₁ | 1870 | 3280 | 4650 | 5980 | 6820 | 7230 | 7390 | 7370 | 5740 |
| <i>Q</i> ₁₂ | 8810 | 14900 | 21300 | 27400 | 33900 | 40700 | 46100 | 51600 | 56900 |
| <i>Условия зарегулированного стока (результаты 10-го цикла расчета)</i> | | | | | | | | | |
| <i>P</i> | 0,481 | 0,026 | 0,021 | 0,017 | 0,012 | 0,009 | 0,004 | 0,001 | 0,000 |
| <i>Q</i> ₁ | 2570 | 4370 | 6220 | 8110 | 10000 | 11900 | 13800 | 15700 | 17700 |
| <i>Q</i> ₂ | 1510 | 2460 | 3300 | 4220 | 5230 | 6330 | 7600 | 8960 | 10400 |
| <i>Q</i> ₃ | 10900 | 18200 | 25500 | 32700 | 39800 | 46800 | 53600 | 60300 | 66900 |
| <i>Q</i> ₄ | 4080 | 6820 | 9530 | 12300 | 15200 | 18200 | 21400 | 24700 | 28100 |
| <i>Q</i> ₅ | 4260 | 7120 | 10100 | 13000 | 15700 | 18400 | 20900 | 23400 | 25800 |
| <i>Q</i> ₆ | 6660 | 11100 | 15400 | 19700 | 24000 | 28400 | 32600 | 36900 | 41100 |
| <i>Q</i> ₇ | 8340 | 13900 | 19600 | 25300 | 31000 | 36600 | 42300 | 48300 | 53900 |
| <i>Q</i> ₈ | 3870 | 6400 | 8910 | 11400 | 13800 | 16300 | 18700 | 21200 | 23700 |
| <i>Q</i> ₉ | 2800 | 4650 | 6500 | 8340 | 10200 | 12100 | 13900 | 15700 | 17400 |
| <i>Q</i> ₁₀ | 2200 | 3680 | 5100 | 6570 | 8110 | 9760 | 11600 | 13600 | 15700 |
| <i>Q</i> ₁₁ | 580 | 970 | 1400 | 1170 | 2090 | 2310 | 2330 | 2150 | 1740 |
| <i>Q</i> ₁₂ | 8920 | 14900 | 21000 | 27000 | 33100 | 39000 | 44700 | 50200 | 55600 |

В основу расчета распределения расходов воды по рукавам положен метод Ф. М. Чернышова [8], который заключается в составлении и решении системы уравнений двух видов:

— уравнения баланса расхода воды в узлах разветвлений и слияний рукавов

$$\sum Q_{вх} - \sum Q_{вых} = 0, \quad (1)$$

— уравнения замкнутости водной поверхности вокруг острова

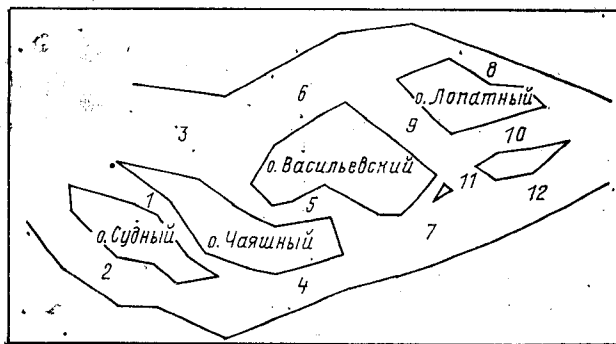
$$\sum \Delta z_{лев} - \sum \Delta z_{прав} = 0. \quad (2)$$

Число уравнений баланса расхода на единицу меньше числа узлов разветвлений и слияний рукавов, а число уравнений замкнутости водной поверхности равно числу островов. Таким образом, общее число уравнений равно числу искомого расходов воды. Полученная замкнутая система нелинейных алгебраических уравнений решалась методом Брауна [10]. Расчет производился для узла разветвления в восточной части дельты Енисея, за его начало было принято разделение потока

на три рукава: Большой Енисей, Каменный Енисей и Судная протока ниже мыса Муксунинского, а за конец — слияние протоки Лопатной, Большого и Каменного Енисея ниже пос. Байкалово (рис. 1, ему соот-

Рис. 1. Гидрографическая схема восточной части дельты Енисея.

1 — Судная; 2, 4, 7, 12 — Каменный Енисей; 3, 6, 9, 10 — Большой Енисей; 5 — Чаяшная; 8 — Лопатная; 11 — Лебяжья.



ветствует нумерация в уравнениях). Система уравнений для этого узла имеет вид:

$$Q_0 - Q_1 - Q_2 - Q_3 = 0, \quad (1a)$$

$$Q_1 + Q_2 - Q_4 = 0, \quad (1b)$$

$$Q_3 - Q_5 - Q_6 = 0, \quad (1в)$$

$$Q_4 + Q_5 - Q_7 = 0, \quad (1г)$$

$$Q_6 - Q_8 - Q_9 = 0, \quad (1д)$$

$$Q_9 - Q_{10} - Q_{11} = 0, \quad (1e)$$

$$Q_7 + Q_{11} - Q_{12} = 0; \quad (1ж)$$

$$\Delta z_1 - \Delta z_2 = 0, \quad (2a)$$

$$\Delta z_3 + \Delta z_5 - \Delta z_1 - \Delta z_4 = 0, \quad (2б)$$

$$\Delta z_6 + \Delta z_9 + \Delta z_{11} - \Delta z_5 - \Delta z_7 = 0, \quad (2в)$$

$$\Delta z_8 - \Delta z_9 - \Delta z_{10} = 0, \quad (2г)$$

$$\Delta z_{10} - \Delta z_{11} - \Delta z_{12} = 0. \quad (2д)$$

Падение уровня водной поверхности Δz Ф. М. Чернышов рекомендует рассчитывать по формуле Шези — Маннинга. Однако для равнинных рек с песчаным руслом, когда приток регулирует шероховатость дна, сопротивление движению перестает быть квадратичным [2]. Для условий нижнего Енисея, русло которого сложено мелко- и среднезернистыми песками, зависимость уклона водной поверхности от числа Фруда имеет линейный характер при малых числах Фруда, то есть в этой области применима формула Шези. При числах Фруда больше 0,03 гидравлическое сопротивление увеличивается медленнее за счет увеличения длины и подвижности донных гряд. В этой области зависимость для гидравлических сопротивлений перестает быть квадратичной и формула Шези уже неприменима.

Для удобства расчета на ЭВМ подобрана гладкая функция, хорошо описывающая как линейный, так и нелинейный участки кривой,

$$\Delta z = 7,5 \cdot 10^{-6} \Delta l \operatorname{arctg} \left(\frac{300}{g \omega^2 h} Q^2 \right). \quad (3)$$

Распределение расходов влекомых наносов по рукавам рассчитывалось по формуле Г. И. Шамова [9]

$$G = 0,95 BV \sqrt{d} \left(\frac{v}{v_n} \right)^3 (v - v_n) \left(\frac{d}{h} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

где $v_n = 3,7 d^{1/3} h^{1/6}$ — неподвижная скорость,
 d — средний диаметр наносов в метрах.

Исходная морфометрическая информация (определение длин Δl , площадей живых сечений ω , средних глубин h , среднего диаметра донного грунта для всех рукавов узла разветвления при уровнях воды, соответствующих каждому расчетному расходу воды Q_0 в вершине узла разветвления) подготавливалась на основе детальных русловых и грунтовых съемок, а также гидрометрических материалов экспедиции МГУ [5]. Морфометрические характеристики рукавов осреднялись по всей их длине, что позволяет рассматривать узел слияния в многолетнем плане, когда локальные эрозийные и аккумулятивные процессы уравниваются друг друга. Величина Q_0 в вершине восточного узла разветвления на основании тех же исследований принималась равной 73% расхода воды у Игарки.

Результаты расчетов сведены в табл. 1. Характер распределения расходов воды по рукавам с изменением расхода воды, поступающей в восточную часть дельты, от 15 до 95 тыс. m^3/c меняется мало: среднее изменение относительной водности рукава составляет 5% и не превышает 10%. Расхождения результатов расчета с гидрометрическими данными не превышают 17%, что укладывается в точность измерения расходов воды в дельте Енисея. Некоторое завышение расчетной доли стока в протоках Судная и Чайшная обусловлено наличием у их истоков блокирующих побочней, влияние которых при осреднении морфометрических характеристик не учитывалось.

По максимуму кривой $G_i p_i = f(Q_i)$ (рис. 2) определены значения руслоформирующих расходов для каждого рукава. Наиболее интенсивные переформирования в разных рукавах дельты Енисея происходят при

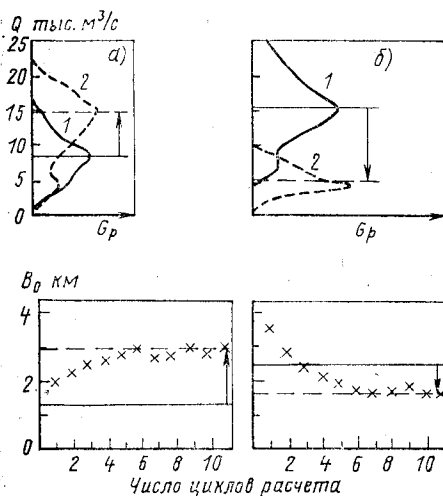


Рис. 2. Эпюры $G_i p_i = f(Q_i)$ для расчета руслоформирующих расходов в естественных условиях (1) и после регулирования стока (2) и рассчитанное изменение «устойчивой» ширины B_0 в протоках дельты Енисея Чайшная (а) и Каменный Енисей (б) в истоке.

разных расходах в вершине узла разветвления (табл. 2). Это явление, ранее установленное для сопряженных узлов русловых разветвлений [7], объясняет разную скорость и направленность русловых переформирований в различных рукавах узла разветвления при изменении гидрологического режима реки.

По полученным значениям руслоформирующих расходов в естественных условиях и морфометрическим характеристикам рукавов построены гидролого-морфометрические зависимости для «устойчивых» ширины рукава по русловым бровкам B_0 и средней глубины h_0 при проектном уровне:

$$B_0 = 21,3 Q_{\phi}^{0,51}, \quad r = 0,89; \quad (5a),$$

$$h_0 = 0,16 Q_{\phi}^{0,34}, \quad r = 0,86, \quad (5b),$$

где r — коэффициент корреляции.

Таблица 2

Изменение величины и обеспеченности руслоформирующих расходов воды в рукавах дельты Енисея после регулирования стока реки и тенденция развития рукавов дельты

| № рукава согласно рис. 1 | Естественные условия | | Условия зарегулированного стока | | Изменение морфологии рукавов |
|--------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| | $Q_{\phi}, \text{ м}^3/\text{с}$ | обеспеченность $Q_{\phi}, \%$ | $Q_{\phi}, \text{ м}^3/\text{с}$ | обеспеченность $Q_{\phi}, \%$ | |
| 1 | 5000 | 8,6 | 10000 | 2,0 | + |
| 2 | 16000 | 4,6 | 5200 | 2,0 | — |
| 3 | 43000 | 4,6 | 40000 | 2,0 | — |
| 4 | 22000 | 4,6 | 15000 | 2,0 | — |
| 5 | 8000 | 8,6 | 15000 | 2,0 | — |
| 6 | 29000 | 6,5 | 24000 | 2,0 | + |
| 7 | 35000 | 3,0 | 31000 | 2,0 | — |
| 8 | 11000 | 8,5 | 14000 | 2,0 | — |
| 9 | 17000 | 6,5 | 10000 | 2,0 | + |
| 10 | 14000 | 3,7 | 8000 | 2,0 | — |
| 11 | 4000 | 11,0 | 800 | 7,7 | — |
| 12 | 46000 | 3,0 | 33000 | 2,0 | — |

Примечание. Плюс — расширение и углубление; минус — сужение и обмеление рукава.

Водоток, имеющий ширину B_0 и глубину h_0 , находится в устойчивом состоянии динамического равновесия. Применимость этого понятия к узлу разветвления восточной части дельты Енисея оправдано отсутствием здесь однонаправленных русловых переформирований, по крайней мере, в течение последних 100 лет. В этой части дельты Енисея практически прекратились дельтообразующие процессы и определяющими стали русловые процессы в сложном узле разветвления [5].

Дальнейшие расчеты устойчивых морфометрических характеристик водотоков для условий зарегулированного стока выполнялись по вышеописанной методике. Стабилизация значений «устойчивых» характеристик B_0 и h_0 в условиях нового гидрологического режима реки произошла после выполнения 8—10 циклов расчета (рис. 2).

Сопоставление современных морфометрических характеристик рукавов с их «устойчивыми» значениями для условий зарегулированного стока (табл. 2) показывает, что:

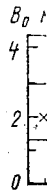
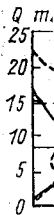
— при регулировании стока воды реки Енисея и уменьшении водности половодья в большинстве рукавов дельты реки значения руслоформирующих расходов воды уменьшатся, соответственно уменьшатся ширины и глубины этих рукавов;

— существенно разработается протока Чайшная, что в условиях относительной стабильности морфологии устьевого участка рукава Каменный Енисей и значительного сужения и обмеления устьевого участка рукава Большой Енисей предопределяет необходимость переноса судового хода на трассу исток Большого Енисея — протока Чайшная — устье Каменного Енисея.

Сделанные выводы в основном совпадают с результатами анализа тенденции развития дельты р. Енисея в условиях современного гидрологического режима [5]. Таким образом, регулирование стока воды Енисея не изменит естественных тенденций развития рукавов дельты, но ускорит перестройку узла разветвления восточной части дельты.

где

пло
ног
отв
рази
тов
[5].
дли
ког
шив
ния
ход
рас
в во
изме
шае
дан
расх
сток
ков
метр
П
русл
ные



разн
ране
[7], об
рован
логиче
По
венны
роены
рины
ном у

Литература

1. Великанов М. А. Русловой процесс. — М., Физматгиз, 1958.
2. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление песчаных русел. — В сб.: Динамика и термика рек, водохранилищ и экстуариев. М., 1984.
3. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. — М., Изд-во АН СССР, 1955.
4. Михайлов В. Н. Гидролого-морфологические закономерности формирования речных дельт. — Вестник МГУ. Серия географ., 1982, № 2.
5. Михайлов В. Н., Коротаев В. Н., Сидорчук А. Ю., Чалов Р. С., Бабиц Д. Б. Исследование водного и руслового режимов устьевой области Енисея. — В сб.: Географические аспекты исследова-

- ний и использование водных ресурсов СССР. М., 1982.
6. Моносов М. А. Влияние перераспределения стока р. Енисей на гидрологический режим ее низовья в связи со строительством энергетических комплексов. Труды Гидропроекта, 1985, вып. 110.
7. Чалов Р. С. Географические исследования русловых процессов. — М., Изд-во МГУ, 1979.
8. Чернышов Ф. М. Расчет распределения расходов по рукавам разветвленной реки. — Труды НИИВТ, 1968, вып. 28.
9. Шамов Г. И. Речные наносы. — Гидрометеоздат, 1959.
10. Brown K. M. A quadratically convergent Newton-like method based on Gaussian elimination. — SIAM on Numerical Analysis, 1969, vol. 6, No. 4.

Московский государственный университет

Поступило
28 XI

A CALCULATION METHOD FOR THE REFORMATION OF BRAIDED-RIVER BEDS UNDER VARIABLE HYDROLOGICAL CONDITIONS

A. M. Alabyan, A. Yu. Sidorchuk

This method is based on hydrologic-morphometrical relationships. The involu dominant discharge is calculated after the N. I. Makkaev technique which takes in account water regime variations through the discharge frequency curve transformation. The method allows for the redistribution of discharge among river arms when the morphometrical characteristics change. Calculating the reformation of a section of the Enisei lower reach is presented for illustration.