

УДК 556.54(282.251.2)

В. Н. Коротаев, В. Н. Михайлов, А. Ю. Сидорчук

**ПРОЦЕССЫ ДЕЛЬТООБРАЗОВАНИЯ В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ ЕНИСЕЯ И ВЛИЯНИЕ НА НИХ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ**

Большинство существующих методов определения интенсивности и направленности развития гидросети и динамики руслового рельефа речных дельт разработаны и апробированы на основе исследований южных и западных рек СССР, так как именно здесь произошло наиболее существенное переформирование дельт под влиянием хозяйственной деятельности. В настоящее время возникла необходимость разработки комплекса методов и усовершенствования уже известных способов оценки возможных изменений дельтового рельефа в условиях широкого распространения многолетней мерзлоты, большого стока воды и малого стока наносов, малой продолжительности безледного периода, столь характерных для дельт севера Сибири. В качестве природной модели выбрана дельта Енисея, где экспедицией МГУ проведены гидрологические, геоморфологические и русловые полевые изыскания.

В устьевую область Енисея через замыкающий створ у Игарки поступает в год в среднем  $547 \text{ км}^3$  воды и около 10 млн т наносов [5]. Высота сгонно-нагонных волн у м. Сопочная Карга достигает 1,0 м, сгонно-нагонные денивеляции уровня отмечаются вплоть до Игарки. Амплитуда приливных волн у м. Сопочная Карга — 0,3—0,4 м. Малая литодинамическая роль морских факторов обусловлена в первую очередь конфигурацией Енисейской губы, где нет условий для проявления наиболее мощного морского фактора — ветрового волнения. Отмеченные обстоятельства обусловили формирование в устьевой области Енисея типичной дельты выполнения залива длиной 100 км с периодом развития 6—7 тыс. лет. В ней выделяется иерархическая структура форм рельефа: 1) частные дельты выполнения, сформированные системами рукавов (длина 50 км и период развития 1—2 тыс. лет); 2) разветвления магистральных рукавов (17 км, 200 лет); 3) побочни, осередки и перекааты (6 км, 50—100 лет); 4) песчаные волны (2 км, 25 лет); 5) шалыги (400 м, 1,5 года); 6) заструги (120 м, 70 сут); 7) дюны (40 м, 15 сут).

Эволюция всей аллювиально-дельтовой равнины и частных дельт связана с перераспределением стока воды и наносов по пространству устьевой области Енисея в течение длительного времени. Исследование таких сложных объектов требует применения развития палеогеоморфологических и палеогидрологических методов. Развитие разветвлений дельтовых рукавов зависит от средних за многолетний период характеристик гидрологического режима и изучается с помощью гидрологических, гидролого-морфологических, геоморфологических и картографических методов. Динамика внутрирусловых грядовых форм руслового рельефа обусловлена не только межгодовой, но и сезонной изменчивостью стока и нуждается в детальных гидрологических и русловых изысканиях и использовании методов руслового анализа.

На основании полевых материалов, аэрофотоснимков, датировок пойменного аллювия по  $^{14}\text{C}$  и спорово-пыльцевым данным составлена геоморфологическая карта дельты Енисея. Выделены следующие фор-

мы рельефа: 1) древняя дельтовая пойма — возраст 6—7 тыс. лет; 2) очень старая пойма — 4—6 тыс. лет; 3) старая пойма — 2—4 тыс. лет; 4) зрелая пойма — 0,8—2 тыс. лет; 5) молодая пойма и высокие пески. Каждому из них соответствует определенный этап развития устьевой области, связанный с формированием частных дельт в системе наиболее многоводных рукавов: 1 — Лукинская дельта; 2 — Охотско-Бреховская; 3 — Малоенисейская; 4 и 5 — Большеенисейская. В течение всего периода формирования голоценовой дельты Енисея наблюдается последовательное перераспределение стока воды и наносов из западной системы магистральных рукавов в восточную, связанную, вероятно, с наличием активной положительной тектонической структуры на левом борту долины Енисея в районе Бреховской отмели [10].

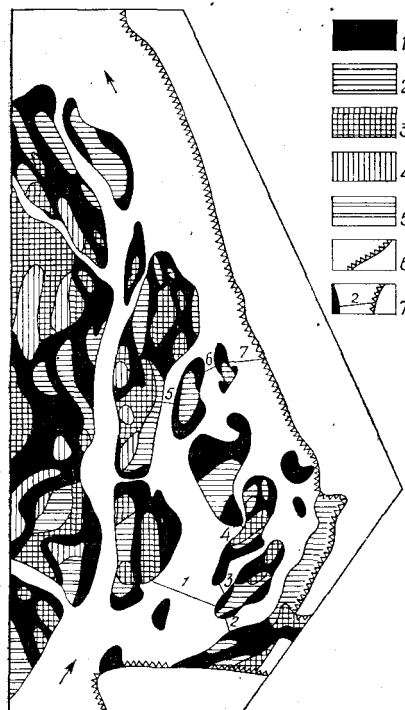
На основе современных гидравлико-морфометрических зависимостей по размерам палеостровов, ширине и радиусам кривизны палеорукавов рассчитаны палеосток Енисея в дельту и распределение его по рукавам для каждого этапа развития. По мощности пойменного аллювия, площадям соответствующих пойм с помощью модели осадконакопления на пойме [4] определены годовое количество наносов, оседавших на дельтовой пойме, и скорость прироста поймы. Палеогидрологический анализ показал, что максимальный сток воды поступал в дельту Енисея в относительно теплое атлантическое время голоцена и составлял 1300 км<sup>3</sup>/год. К настоящему времени он уменьшился более чем вдвое [5]. Скорость горизонтального прироста первично-дельтовой островной поймы уменьшалась во времени: на 1-м этапе она составляла 0,5 км<sup>2</sup>/год, на 2-м — 0,4, на 3-м — 0,15, на 4-м — 0,2 и на 5-м — 0,05 км<sup>2</sup>/год. Таким образом, активность дельтообразующих процессов постепенно уменьшалась. Одновременно усилилась активность русловых процессов — формирование в дельтовых рукавах вторичных разветвлений, переработка дельтовых островов меандрирующими протоками. Так, если на 1-м и 2-м этапах скорость горизонтального прироста вторичной островной поймы не превышала 0,05 км<sup>2</sup>/год, то на 3-м она равнялась 0,25, на 4-м — 1,1 и на 5-м — 1,0 км<sup>2</sup>/год. В процессе нарастания поймы в высоту, образования наилка на ее поверхности в дельте Енисея в год оседало: на 1-м этапе ее развития — 2,0 млн т наносов, на 2-м — 3,5 млн, на 3-м — 7 млн, на 4-м — 8 млн, на 5-м — 4,5 млн т. Приведенные цифры носят оценочный характер, их точность определяется точностью датирования пойменных массивов и не превышает ±20%.

В результате за вторую половину голоцена произошло полное заполнение наносами верхней части Енисейской губы, сформировалась дельта общей площадью 4400 км<sup>2</sup>. В настоящее время этот участок долины Енисея характеризуется в основном русловыми процессами, свойственными сложным разветвлениям с хорошо развитой пойменной многоруканностью.

Исследование гранулометрического состава современного руслового аллювия в восточной части дельты показывает, что в дельтовых рукавах и протоках распространены все типы песчано-илистых отложений (от мелкоалевритовых илов до крупнозернистых песков). Более крупные наносы (гравий и галечники) распространены локально и обычно связаны с выходами коренных пород в русле и по берегам (например, Каменный Енисей). Песчаные отложения характеризуются хорошей сортированностью и покрывают до 90% площади днищ развивающихся дельтовых рукавов (средний диаметр наносов от 0,17 до 0,31 мм). Алевриты и мелкоалевритовые или (средний диаметр

$< 0,1$  мм) встречаются преимущественно в узких, извилистых отмирающих протоках (Судная, Лопатная), занимая от 58 до 70% площади их русла. В целом наблюдается закономерное и постепенное уменьшение среднего диаметра русловых наносов вдоль дельтовых рукавов и проток вниз по течению.

Анализ современных тенденций в развитии рукавов дельты Енисея вполне правомерно проводить традиционными приемами, разработанными для анализа русловых процессов на реках такого типа. Карто-



Фрагмент геоморфологической схемы дельты Енисея. Условные обозначения: 1 — русловая пойма; 2—5 — дельтовая пойма (молодая, зрелая, старая и древняя); 6 — борта долины Енисея; 7 — створы (см. таблицу)

графический метод в совокупности с методом тенденций и аналогов в условиях дельты Енисея позволяет проследить эволюцию крупных разветвлений дельтовых рукавов за последние 100 лет. Проведено сопоставление карты А. Е. Андреева (1866) [6], откорректированной А. И. Вилькицким [3], К. И. Окуlichem и Е. В. Близняком [2]; карт гидрографической службы Главсевморпути (1934), аэрофотоснимков (1947 и 1977). Анализ изменения во времени положения и размеров зон аккумуляции наносов и размыва берегов показал, что в центральной части дельты, в области распространения древней, очень старой и старой пойм (т. е. частных дельт первых трех этапов развития) преобладали процессы аккумуляции. С 1866 г. к настоящему времени отмирает крупный рукав Охотский Енисей, расчлененный вторичными островами и осередками на серию узких и мелких проток; сужаются более мелкие протоки. Некоторые из них (протока Алешинская) с уменьшением водности интенсивно меандрировали, размывая берега и замещая старые пойменные поверхности молодой гривистой поймой.

В восточной части дельты Енисея (рисунок), куда перераспределился основной сток, картографическим методом обнаружено закономерное изменение в развитии рукавов (табли-

ца), связанное с блужданием динамической оси потока при прохождении в их истоках крупных гряд — побочней и осередков. Так как период развития последних (время их смещения на полную длину) составляет 50—100 лет, то в тех же пределах находится и период активизации или заиления рукавов крупных разветвлений.

Современные тенденции развития дельтовых рукавов можно исследовать также гидрометрическим методом (таблица). Он основан на эмпирическом правиле: в простом двухрукавном разветвлении активность выше там, где доля стока увеличивается при уменьшении расхода воды в узле разветвления. Натурный материал для гидрометрических расчетов был получен нами в 1976—1978 гг. при проведении детальных измерений распределения расходов воды по рукавам дельты. До-

полнительно проведен расчет экстремально больших расходов воды по рукавам (сделанный на ЭВМ по методике Ф. М. Чернышова [11]).

Гидролого-морфологический метод опирается на гипотезу саморегулирования гидравлических и морфометрических характеристик водотоков дельты, их стремления к состоянию динамической устойчивости в условиях постоянства независимых факторов. Эти показатели речных русел в размываемых грунтах складываются в результате взаимного приспособления потока и русла. Исследования в низовьях и дельтах крупных рек [8, 9] показали, что они связаны с руслоформирующим расходом воды зависимостями:  $B_0 = K_B Q^{1/2}$ ;  $h_0 = K_h Q^{1/3}$ ;  $V_0 = K_V Q^{1/6}$ ;  $I_0 = K_I Q^{1/9}$  (1). Здесь коэффициенты зависят от транзитной мутности воды в рукавах дельт в половодье, а для дельт с малыми мутностями

#### Направленность русловых деформаций в водотоках восточной части дельты Енисея

№ створа	Рукав, протока	Методы оценки направленности				
		картографический	гидрометрический	гидролого-морфометрический		
				для современного гидрологического режима		для зарегулированного стока
		$Q_\Phi$ по В. Н. Михайлову		$Q_\Phi$ по Н. И. Маккавсеву		
1	Большой Енисей (исток)	+	+	+	+	+
2	Каменный Енисей (исток)	—	—	—	—	—
3	Судная	—	—	—	—	+
4	Чаяшная	+	?	+	+	+
5	Лопатная	—	—	—	?	?
6	Большой Енисей (устье)	—	?	—	—	—
7	Каменный Енисей (устье)	+	+	?	+	+

Примечание. + — активизация, размыв; — — отмирание, заиление; ? — тенденция неопределенная.

воды ( $\rho < 1,0 \text{ кг/м}^3$ ), характерными для северных и сибирских рек, могут определяться следующим образом:  $K_B = 4,6 \cdot \rho^{-0,35}$ ;  $K_h = 0,65 \rho^{0,16}$ ;  $K_V = 0,34 \rho^{-0,19}$ ;  $K_I = 8,3 \times 10^{-5} \rho^{0,17}$ .

В дельтах рек из-за изменений общего гидрологического режима в их вершинах и перераспределения стока воды и наносов в сети дельтовых водотоков устойчивое состояние русел нарушается. Поэтому «устойчивых» в полном смысле водотоков практически не бывает. Происходят русловые деформации (размыв или заиление) дельтовых рукавов, направленные к достижению такой устойчивости. Полученные зависимости открывают большие возможности для определения тенденции русловых преформирований в низовьях и дельтах рек. Теоретические построения и анализ большого фактического материала [9] показывают, что водотоки дельт в стадии активизации (размыва) обычно уже и глубже, имеют большие уклоны и скорости течения, чем устойчивые с таким же руслоформирующим расходом воды. Отмирающие водотоки обычно шире, но мельче и имеют меньшие уклоны и скорости течения, чем устойчивые с тем же стоком. Наиболее консервативной характеристикой оказывается ширина русла. При активизации (отмирании) водотока она отстает в своем увеличении (уменьшении) от изменения других характеристик. Поэтому соотношение между фактической и устойчивой (при данном руслоформирующем расходе воды) шириной дельтового водотока — весьма надежный признак его активизации или отмирания.

При использовании гидролого-морфологического метода определяющее значение имеет выбор руслоформирующего расхода воды ( $Q_{\phi}$ ). Для водотоков дельты Енисея они рассчитывались двумя взаимодополняющими способами. В рамках первого предполагается, что  $Q_{\phi}$  являются те, при которых связь между гидравлико-морфометрическими характеристиками и соответствующими расходами воды оказывается наилучшей [1]. Применение способа сводится к поиску максимума функции коэффициентов корреляции для гидравлико-морфометрических зависимостей. Расход воды в вершине дельты, соответствующий максимальному коэффициенту корреляции, принимается в качестве  $Q_{\phi}$ , к нему и приспособлена морфометрия водотоков дельты.

При втором способе  $Q_{\phi}$  по Н. И. Маккавееву [7], считаются те расходы воды, суммарное воздействие которых в многолетнем разрезе вызывает наибольшие русловые переформирования. Применение его сводится к поиску для каждого рукава дельты максимума кривой связи произведения расхода влекомых наносов ( $G$ , чаще всего рассчитанного) на его повторяемость ( $p$ ) с расходом воды. При этом последний, соответствующий максимуму, и будет руслоформирующим  $Q_{\phi}$ .

Для дельты Енисея были построены гидравлико-морфометрические зависимости вида (1) с использованием  $Q_{\phi}$  расходов, вычисленных двумя способами. Путем сравнения фактических характеристик с их устойчивыми значениями выявлена тенденция развития рукавов в условиях современного гидрологического режима реки (таблица). При обоих способах наблюдается как близость значений устойчивых морфометрических характеристик рукавов, так и полное совпадение тенденции их развития.

Способ расчета руслоформирующих расходов воды по модифицированной методике Н. И. Маккавеева [7] открывает возможность использования гидравлико-морфометрических зависимостей для оценки тенденции развития дельтовых рукавов в условиях режима реки, измененного хозяйственной деятельностью. Применим следующий алгоритм: 1) для условий неизмененного гидрологического режима рассчитывается кривая повторяемости ежедневных расходов воды в вершине дельты за период 20—25 лет; 2) гидравлическим методом рассчитывается или измеряется распределение стока воды и влекомых наносов по рукавам дельты для всего диапазона изменения расходов воды в ее вершине; 3) по максимумам функции  $pG = f(Q)$  определяются руслоформирующие расходы для каждого из рукавов дельты; 4) строятся гидравлико-морфометрические зависимости вида (1) для устойчивых характеристик рукавов; 5) рассчитывается кривая повторяемости ежедневных расходов воды в условиях измененного гидрологического режима; 6) находятся новые значения  $Q_{\phi}$ ; 7) для этих руслоформирующих расходов воды по известным гидравлико-морфометрическим зависимостям определяются новые устойчивые морфометрические характеристики рукавов дельты (ширина и глубина); 8) гидравлическим методом получается новое распределение расходов воды по рукавам дельты исходя из новой морфометрии рукавов. Этапы расчета (с 6 по 8) циклически повторяются (обычно 5—6 раз) до достижения мало изменяющихся от цикла к циклу устойчивых морфометрических характеристик. Проводится сравнение устойчивых гидравлических и морфометрических характеристик рукавов с фактическими и устанавливается тенденция развития рукавов дельты в условиях измененного гидрологического режима реки.

Для дельты Енисея был рассмотрен вариант регулирования стока реки водохранилищами проектируемых Среднеенисейской и Туру-

ханской ГЭС, в результате которого произойдет значительное уменьшение повторяемости расходов воды выше 30 000 м<sup>3</sup>/с. Расчеты показывают, что тенденция к активизации или отмиранию рукавов дельты Енисея в основном сохранится такой же, как и в условиях неизменного стока, но активность русловых переформирований уменьшится (таблица).

Как видно из таблицы, все использованные методы хорошо дополняют друг друга, а результаты оценок в целом совпадают. Поэтому можно сделать вывод: в условиях современного гидрологического режима реки и при регулировании его водохранилищами ГЭС наиболее вероятны усиление неблагоприятных русловых переформирований (сужения и обмеления) в левобережных рукавах восточной дельты Енисея и активизация правобережных рукавов, тяготеющих к ведущему коренному берегу. В отдаленном будущем следует предположить формирование здесь малорукавного русла с магистральным рукавом либо по современному Каменному Енисею, либо по трассе: исток Большого Енисея — протока Чайшная — устье Каменного Енисея. Такие переформирования согласуются с общей направленностью перехода основного стока в дельте Енисея в восточные рукава, выявленной в результате палеогеоморфологического анализа. Этот вывод важен тем, что современный судоводительский ход в дельте Енисея проходит по рукаву Большого Енисея, имеющему тенденцию к обмелению практически на всем своем протяжении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабич Д. Б., Михайлов В. Н., Морозов В. Н. Оценка руслоформирующих расходов воды в дельтах крупных рек//Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, Геогр. 1985. № 1.
2. Близняк Е. В. Заметки о нижнем Енисее. Пг., 1914.
3. Вилькицкий А. И. Материалы для изучения Обской губы и Енисейского залива, собранные в 1894—1895 и 1896 гг. под начальством подполковника Вилькицкого. Спб., 1900.
4. Гаррисон Л. М., Коротаев В. Н., Сидорчук А. Ю. Палеогеоморфологический анализ дельтовой равнины р. Енисей//Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, Геогр. 1981. № 6.
5. Иванов В. В., Осипова И. В. Сток в устьевой области Енисея и его многолетняя изменчивость//Тр. ААНИИ. 1974. Т. 308.
6. Лопатин И. А. Дневник Туруханской экспедиции 1866 г.//Зап. РГО. 1897. Т. 28, № 2.
7. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М., 1955.
8. Михайлов В. Н., Рогов М. М., Макарова Т. А., Полонский В. Ф. Динамика гидрографической сети неприливых устьев рек. М., 1977.
9. Михайлов В. Н. Гидролого-морфологические закономерности формирования речных дельт//Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, Геогр. 1982. № 2.
10. Рихтер В. Г. Методы изучения современной тектоники морского дна. М., 1965.
11. Руководство по применению ЭВМ при проектировании землечерпательных и выправительных работ. М., 1975.

Поступила в редакцию  
30.12.86