ЭРОЗИЯ ПОЧВ
И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

выпуск
9

Д. Б. Бабич, А. Л. Богомолов, Г. М. Заец, В. Н. Коротаев, Р. В. Лодина, В. Н. Михайлов, А. Ю. Сидорчук, Р. С. Чалов

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ДЕЛЬТООБРАЗОВАНИЯ И ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕЛЬТЫ ЕНИСЕЯ

Устьевая область Енисея — крупнейшей реки СССР — уникальный объект. Могучая река с годовым стоком воды более 500 км³ и стоком наносов лишь 11 млн. т протекает здесь в относительно узкой долине, постепенно переходящей в залив эстуарного типа (губу), и характеризуется значительными глубинами. Морские суда заходят в реку на несколько сотен километров вверх по течению, вследствие чего значение Енисея как транспортной магистрали имеет огромное значение, особенно возросшее в связи с открытием круглогодичной навигации по Северному морскому пути.

Наиболее сложным в устьевой области Енисея является дельтовый участок. Здесь река разбивается на рукава, появляется большое количество островов и отмелей, уменьшаются глубины. Одновременно увеличивается динамичность русловых образований. Именно здесь возникает необходимость регулирования руслообразующих процессов, чтобы обеспечить нормальные условия судоходства в течении круглого года. Это определило необходимость выполнения специальных исследований русловых процессов и форм их проявления в дельте Енисея, результаты которых положены в основу прогноза ее развития.

ГИДРОГРАФИЧЕСКАЯ СЕТЬ И РУСЛОВЫЕ ФОРМЫ ДЕЛЬТЫ

За вершину дельты Енисея принимается район мыса Крестовского, где в начале расширения долины от реки отделяется влево первый рукав, самостоятельно впадающий в море, протока Широкая. В пределах дельты долина Енисея характеризуется чередованием расширений и сужений (рис. 1). Верхнее расширение (Крестовско-Муксунинское) начинается у мыса Крестовского и достигает максимальной ширины 37 км ниже мыса Казанцевского. У мыса Муксунинского долина несколько сужается, а затем борта резко расходятся, образуя обширное Танамо-Мунгуйское расширение с максимальной шириной 77 км. Новое сужение долины находится у мыса Сопочная Карга. Ниже по течению борта долины снова резко расступаются, образуя воронку Енисейского залива.

Рис. 1. Схема гидрографической сети дельты р. Енисея:
1 — уступ коренного борта долины; *2* — молодая пойма; *3* — зрелая пойма; *4* — старая пойма; *5* — очень старая пойма; *6* — древняя пойма. *Перекаты:* I — Безымянный; II — Турушинский. *Острова:* ПП — Пашков-Песчаный; К — Казанский; Б — Большой; М — Мининские; П — Песчаные; С — Судный; Ч — Чяшный; В — Васильевский; Л — Лопатный; Т — Турушинский. *Архипелаги:* Б—Б — Большой Бреховской; М—Б — Малый Бреховской.

Русло и пойма Енисея в верхней части дельты (в Крестовско-Муксунинском расширении) практически не несут еще дельтовых черт. Здесь развиты типичные русловые формы: серии простых сопряженных и односторонних разветвлений первого порядка. Эти разветвления создаются цепочкой островов Пашкова-Песчаного, Казанского, Большого, Мининских, возле которых основной расход воды сосредотачивается последовательно в левых или правых рукавах. Нарушения правила «восьмерки», наблюдаемые в этих разветвлениях, связаны с влиянием высокого коренного берега, к которому стремится прижаться основное русло. Второстепенные рукава в этих разветвлениях, как правило, маловодные. Основные рукава, в свою очередь, характеризуются разветвленностью второго порядка. Таковы односторонние и одиночные разветвления у островов Луковых, Песчаного, банки Сеченской.

Каждый вторичный узел разветвления характеризуется сложной структурой руслового рельефа. Так о. Песчаный представляет собой бархаообразный осередок, неосвоенный растительностью. Его длина 8 км, ширина 4 км, относительная высота до 20 м. На дне рукавов, огибающих остров, выделяются крупные гряды-перекаты длиной 5—6 км и относительной высотой до 8 м. Максимальной высоты они достигают в истоках обоих рукавов, создавая здесь лимитирующие судоходство участки. На поверхности перекатов расположены шалыги — гряды длиной 2,5—3 км и высотой до 3 м. Все эти мезоформы руслового рельефа покрыты микроформами разных размеров. Наиболее крупные микроформы — заструги — имеют длину 250—600 м, высоту до 2 м. Поверхность заструг осложнена рифелями длиной 60—200 м, высотой 0,5—2,0 м и крупными песчаными волнами длиной 10—80 м и высотой 0,5—2,5 м.

Русловая сеть левой части Крестовско-Муксунинского расширения представляет собой пойменную многорукавность. Протоки здесь свободно меандрируют или делятся на рукава мелкими островами.

В Танамо-Мунгуйском расширении Енисей строит сложное разветвление типа дельты выполнения заливов, разделенное на три части: восточную, центральную (наибольшую по площади) и западную. В восточной части сформировалось современное дельтовое разветвление, в котором выделяются разветвления двух порядков. Разветвление первого порядка начинается непосредственно ниже мыса Муксунинского и представлено двумя рукавами — Большим Енисеем (левым), протекающим среди пойменных островов, и Каменным Енисеем (правым), тяготеющим к коренному борту долины. Рукава разделяются массивом островов — Судным, Чяшным, Васильевским, Турушинским. Разветвления второго порядка образуются возле этих островов, а также у островов Лопатного и Гусиных.

Более низкий ранг русловых форм составляют различные аккумулятивные образования в руслах всех рукавов дельты. Их скопления в узлах разветвления второго порядка, создают мелководные участки. Из них наиболее изучен Турушинский участок (Иванов, Гиляров, 1965; Коротаев и др., 1980), располагающийся в русле Большого Енисея перед узлом разветвления на Турушинскую и Лебяжью протоки. Здесь выделяются гряды, имеющие линейные размеры 2—3 км и образующие осередки или причлепившиеся к берегу косы. Так называемый Турушинский перекат представляет собой две слившиеся гряды, образующие два гребня этого переката. На поверхности гряд (в основном на их подводных частях) располагаются шалыги, имеющие длину 200—600 м и относительную высоту 0,7—1,5 м. На шалыгах встречаются заструги длиной 50—100 м и высотой 1,0—2,0 м. Все перечисленные формы гофрируются рифелями длиной 10—30 м, относительной высотой 0,3—0,7 м. Уменьшение в Турушинском узле размеров русловых форм по сравнению с соответствующими (шалыгами, застругами, рифелями) на Безымянном перекате объясняется меньшей (в четыре раза) водностью протоки Большой Енисей по сравнению с главным руслом Енисея.

Малый Енисей занимает промежуточное положение между системами рукавов восточной и центральной частей дельты Енисея. С одной стороны, он образует вместе с Большим и Каменным Енисеем дельтовое разветвление первого порядка; с другой стороны, от него ответвляются большинство проток центральной части дельты. Эти многочисленные протоки сравнительно маловодны. Имея большую длину, они либо свободно меандрируют, либо небольшими островами разветвляются на короткие рукава. В совокупности они составляют пойменную многорукавность, благодаря которой вся дельтовая пойма расчленяется на различные по форме и размерам острова, составляющие архипелаг Больших Бреховских островов. Часть наиболее крупных пойменных проток направляется в западную часть дельты Енисея.

Дерябинский Енисей, протекающий вдоль левого берега долины, в своем устье формирует западное современное дельтовое разветвление. Здесь выделяются разветвление первого порядка на рукава Правый и Левый Дерябинский, разделенные архипелагом Малых Бреховских островов, и разветвления второго порядка — у каждого острова архипелага. В устьевых частях наиболее крупных рукавов и проток образуются устьевые косы и бары.

ДЕЛЬТОВАЯ ПОЙМА

В дельте Енисея выделяются следующие морфологические и возрастные разновидности дельтовой поймы: древняя, очень старая, старая, зрелая и молодая. Поверхность древней дельтовой поймы возвышается над меженным уровнем на 7—9 м.

Она сильно переработана мерзлотными и эрозионными процессами. Различают две ее разновидности: с омоложенным русловым рельефом и мерзлотным рельефом. Поверхность первой часто заливается в половодье; ориентировка крупных термокарстовых озер и мелких извилистых протоков соответствует направлению стока полых вод. Полигональный мерзлотный рельеф развит слабо. Поймы второй разновидности в половодье не заливаются. Русловой рельеф здесь сохранился плохо.

Очень старая дельтовая пойма поднята над меженным урезом на 6—8 м. Ее поверхность в высокую воду практически не заливается, первичный рельеф переработан мерзлотными процессами. Эта пойма составляет основу рельефа центральной части дельты. По характеру первичного руслового рельефа она разделяется на два типа: островную, первичнодельтовую и сегментно-гривистую, вторичнодельтовую. Островная пойма характеризуется наличием элементарного острова и отходящих от него вниз по течению повышенных прирусловых валов. Между валами расположена пониженная центральная пойма острова. Сегментно-гривистая пойма образуется при причленении к островам побочней, процесс ее формирования обычно сопровождается размывом островной поймы на вогнутых берегах излучин.

Старая дельтовая пойма имеет высоту 7—10 м в вершине дельты и снижается до 3—5 м к ее морскому краю. Она заливается только в самые высокие паводки. Первичный русловой рельеф на ее поверхности сохранился хорошо, мерзлотные формы лишь подчеркивают его. Старая дельтовая пойма развита в центральной части дельты в виде островной и сегментно-гривистой, узкими лентами окаймляющими массивы древней и очень старой поймы.

Зрелая дельтовая пойма развита повсеместно, имеет высоту 6—8 м у вершины дельты и 2—4 м — ближе к ее морскому краю, заливается в высокие половодья. Мерзлотные полигоны встречаются здесь только на самых повышенных участках. Среди массивов зрелой поймы выделяются островная, сегментная и мелкоостровная. Островная зрелая пойма широко развита в восточной и западной частях дельты. В центральной части дельты при отмирании рукаво вмежду массивами древней и старой поймы формируется сегментно-мелкогривистая и мелкоостровная зрелая пойма.

Молодая дельтовая пойма также распространена повсеместно. Она имеет высоту 2—4 м у вершины и 1—2 м в приморской части дельты. Заливается водой в половодье и во время сильных нагонов. Поверхность ее не изменена мерзлотными процессами, хотя толща отложений скована мерзлотой. Островная молодая пойма встречается только в западной части дельты и имеет проточно-островной характер. В восточной

части дельты молодая пойма представлена в основном сегментно-крупногривистыми массивами, окаймляющими острова со зрелой поймой. Встречается здесь и мелкоостровная молодая пойма. В центральной и верхней частях дельты развита сегментно-мелкогривистая и мелкоостровная пойма в отмирающих протоках.

Переходные между пойменным и русловым рельефом аккумулятивные формы (побочни, осередки, косы), начинающие покрываться растительностью, полностью заливаются во время половодья и нагонов, имеют высоту 3 м у вершины дельты и до 0,5 м у ее морского края. Некоторые осередки имеют облик обсыхающих отмелей на устьевых барах и косах, т. е. связаны с элементами первично-дельтового рельефа. Однако большая часть осередков и побочней, развитых в протоках между дельтовыми островами, относятся уже к вторично-дельтовому рельефу.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕЛЬТЫ ЕНИСЕЯ

Картографирование дельтовой поймы, радиоуглеродные датировки и определение возраста отдельных частей поймы (Гаррисон и др., 1981) позволяют наметить последовательность образования дельты Енисея. На первом этапе, когда формировалась древняя пойма (6—7 тыс. лет назад), основной сток Енисея проходил вдоль западного борта долины. Накопление аллювия и выдвижение дельты происходило за счет активного развития левобережных рукавов. В пределах Крестовско-Муксунинского расширения долины функционировали древние рукава — Широкая и Большая протоки, а ниже сужения долины у мыса Муксунинского формировался устьевой бар, впоследствии составивший ядро острова Лукинского. В это время происходило образование первичнодельтовой островной поймы; скорость дельтообразования составляла в среднем около 0,45 км²/год.

По мере выполнения верхней части залива и выдвижения внешнего края дельты в Танамо-Мунгуйское расширение, основной сток и область аккумуляции сместилась в центральную часть залива. Начался второй этап формирования дельты, образовались массивы очень старой поймы (6—4 тыс. лет назад). Максимальный сток концентрировался в пра-Большом Енисее, который разветвлялся на рукава Охотско-Бреховской и Малый Енисей, закладывая основу архипелага Больших Бреховских островов. При этом в западной и восточной частях расширения оставались глубоко вдающиеся в сушу заливы Дерябинский и Большеенисейский. Дельтообразование шло довольно активно, формирование гривисто-островной первичнодельтовой поймы происходило со скоростью 0,41 км²/год. Одновременно началась переработка меандрирующими протоками древних островов, однако скорость формирования вторичной сегментно-гривистой поймы не превосходила 0,04 км²/год.

На третьем этапе развития дельты Енисея началось заполнение остаточных заливов. Старая пойма формировалась (4—2 тыс. лет назад) вдоль пойменных берегов заливов, вследствие чего происходило расширение архипелага Бреховских островов. Преимущественное развитие получали при этом восточная часть дельты, куда стал направляться основной сток воды и наносов. Однако скорость дельтообразования уменьшилась, прирост площади первичнодельтовой островной поймы не превосходил 0,15 км²/год. Одновремено активизировалась переработка первичнодельтового рельефа. Вторичнодельтовая сегментно-гривистая пойма наращивалась со скоростью 0,15 км²/год, вторичнодельтовая островная (в основном, в верхней части дельты) — 0,12 км²/год. В этот этап отмирают многие рукава Танамо-Мунгуйского расширения долины, консолидируется архипелаг Бреховских островов.

По мере отмирания рукавов, несших свои воды в западную часть дельты, сток все более концентрировался в восточном, Большеенисейском заливе, где продолжалась аккумуляция наносов. Здесь формировались многочисленные дельтовые острова и формировалось современное восточное дельтовое разветвление. Острова представлены здесь зрелой поймой, возраст которой 2—0,8 тыс. лет. В это же время в устье Дерябинского Енисея происходит формирование западного современного дельтового разветвления. Скорость наращивания первичнодельтовой поймы составляла 0,18 км²/год. На четвертом этапе развития дельты Енисея существенно увеличивалась скорость образования вторичнодельтовой поймы. Площадь сегментно-гривистой поймы нарастала со скоростью 0,94 км²/год, вторичной островной — 0,135 км²/год.

Пятый этап развития дельты Енисея занимает последние 800 лет. В это время формируется молодая пойма, продолжается заполнение наносами восточной и западной частей дельты, острова объединяются в пойменные массивы. Процессы первичного дельтообразования замедляются: прирост первичнодельтовой поймы не превышает 0,06 км²/год. В то же время весьма высокой оставалась скорость образования вторичной сегментно-гривистой поймы — 0,97 км²/год. Вторичнодельтовая островная пойма практически не образовывалась (прирост 0,04 км²/год), так как древние рукава уже отмерли, а в современных еще не начался процесс активного вторичного разветвления.

В настоящее время (последние 30 лет) тенденция, наметившаяся на четвертом — пятом этапах формирования дельты, продолжается. В восточной части дельты, на островах между Большим и Каменным Енисеем, площадь дельтовой поймы

даже несколько уменьшилась, за счет размыва берегов. Ниже слияния Большого, Каменного и Малого Енисея на обширной акватории по всей ее площади формируются отмели, между которыми проходят углубленные борозды. На основе этих отмелей формируются осередки, скорость нарастания которых составляет 0,08 км²/год.

В западной части дельты в устье каждого рукава Дерябинского Енисея, впадающего в мелководную часть залива, образуются устьевые косы и баровые осередки. Мелководность приемного водоема обусловливает довольно высокую, на фоне в целом замедленных русловых деформаций, скорость выдвижения устьевых кос. Надводные части кос удлиняются на 10—30 м/год, подводные части — 60—200 м/год. Одновременно продолжается консолидация массива Малых Бреховских островов.

В центральной части дельты продолжается процесс отмирания мелководных проток. В их истоках формируются осередки и побочни, которые, разрастаясь со скоростью 0,9 км²/год, блокируют вход в протоки. Сами русла проток еще сохраняют значительную глубину.

ДИНАМИКА ГИДРОСЕТИ И РУСЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

По мере развития и усложнения дельты Енисея интенсивность первичного дельтообразования уменьшается, по возрастает активность вторичных, русловых, переформирований. В настоящее время именно они определяют основные изменения дельты.

В динамике основного русла Енисея от вершины дельты до мыса Муксунинского проявляются две противоположные тенденции: разветвление русла на рукава отдельными островами и причленение островов к коренному или к пойменному берегу и сосредоточение потока в едином русле. Так, судя по рельефу дельтовой равнины, в прошлом здесь была развита система простых сопряженных разветвлений первого порядка, в которых распределение расходов воды подчинялось правилу «восьмерки». Постепенно сток воды сосредоточился возле ведущего коренного берега в правобережном рукаве в двух средних звеньях системы. Острова присоединились к левобережной пойме, а огибавшие их слева рукава превратились в пойменные протоки. В результате цепочка сопряженных разветвлений была разорвана, и между ставшими одиночными узлами разветвления Усть-Портовским и Мининским возник участок относительно прямолинейного русла. Однако в расширениях последнего сформировались разветвления второго порядка — Лукинское и Песчаное. В Лукинском разветвлении правобережная протока Луковая постепенно отмирает: еще в 1866 г. (Лопатин, 1897) она была относительно широкой и удобной

для захода судов; к началу XX века протока суживается и мелеет, а в настоящее время острова практически примыкают к правому берегу. Положение в плане осередка в Песчаном разветвлении более стабильное: со времен съемки А. И. Вилькицкого (1900), т. е. с 1896 г. местоположение его не изменилось. Однако, судя по форме осередка, основной сток воды и наносов (54 и 59%, соответственно) проходят в левом рукаве у осередка, где расположен перекат Безымянный. Промеры 1955—1978 гг. показывают, что в многоводные годы происходит увеличение радиуса кривизны левого рукава, общее снижение средних отметок дна на перекате и усложнение иерархии русловых гряд. В маловодные периоды радиус кривизны левобережного рукава уменьшается, средние отметки дна на перекате увеличиваются, исчезают некоторые виды донных гряд, рельеф русла становится более простым. В результате в многоводные годы судоходные условия на перекате улучшаются, в маловодные — ухудшаются.

У мыса Муксунинского располагается узел разветвления на рукава Малый и Большой Енисей. Малый Енисей со времени своего формирования постепенно теряет свое значение магистрального рукава. В XIX веке (Лопатин, 1897) глубины на входе в Малый Енисей вдвое превышали современные. Обмеление переката в его истоке сопровождалось уменьшением радиусов кривизны излучин русла Малого Енисея. Более 60% стока воды магистрального русла поступает теперь в Большой Енисей. Превращение Малого Енисея в боковой дельтовый рукав, по-видимому, является следствием изменения положения его истоков по отношению к направлению главного течения реки по мере смещения излучины основного русла у Мининских островов. Так, в середине XIX века мыс Лопатка был ориентирован на север (Лопатин, 1897); в настоящее время он развернулся на восток, вследствие чего истоки Малого Енисея оказались в области скоростной тени.

В узле разветвления на Большой и Каменный Енисей ширина и глубина рукавов практически одинаковы, но в Большой Енисей (левый рукав) идет в 2—2,5 раза больше взвешенных наносов. Это способствует тому, что левобережный побочень в его начале постепенно разрастается как вверх по течению, так и в сторону русла. Одновременно правый берег рукава, образованный островами Песчаными, размывается со скоростью 20 м/год. В результате радиус кривизны потока на входе в Большой Енисей уменьшается, а сам рукав оказывается в неблагоприятных условиях для развития. В то же время в истоке Каменного Енисея (правый рукав) происходит увеличение радиуса кривизны, что благоприятствует его развитию. Однако ниже островов Песчаных от Каменного Енисея ответвляются Безымянная и Судная протоки, несущие воды в Большой Енисей и уменьшающие сток Каменного Енисея.

В результате в верхней части Каменного Енисея происходит активная аккумуляция наносов, здесь располагаются мелководные перекаты. Площади вновь образовавшихся за период 1947—1977 гг. отмелей и островов почти вдвое превысили размывы берегов. Тенденция развития этого участка рукава будет зависеть в основном от состояния упомянутых проток. На входе в Безымянную протоку к настоящему времени сформировался относительно мелководный перекат, а вход в нее несколько искривляется за счет роста песчаных кос в оголовке островов Песчаных. Истоки протоки Судной периодически оказываются то в области замедления течения на выпуклой стороне излучины русла Каменного Енисея, то в области активизации размывов на вогнутой стороне излучины. Знак кривизны русла в истоке протоки Судной зависит от условий захода в Каменный Енисей и изменяется примерно через 50—70 лет. В настоящее время начался этап аккумуляции в истоках протоки Судной, и поэтому можно ожидать активизации Каменного Енисея.

Узел ответвления протоки Чаяшной от Большого Енисея располагается в вершине крупной излучины основного рукава, т. е. в условиях, благоприятных для развития протоки в настоящее время. Однако протока Чаяшная также испытывает периодическую активизацию, сменяющуюся процессами отмирания. В середине XIX века протока была слабо извилистой, но в начале XX века уже сильно меандрировала (что свидетельствует об уменьшении в ней стока воды). Затем в вершинах излучин сформировались отмели, и русло в плане стало более пологим. По-видимому, это связано со смещением вдоль правого берега Большого Енисея побочней, периодически перекрывавших заход в протоку. В настоящее время такой побочень находится ниже истоков протоки Чаяшной. В самой протоке происходит аккумуляция наносов в вершинах излучин, тогда как выпуклые берега размываются со скоростью 4—6 м/год. В итоге протока находится в стадии активизации.

Активные русловые переформирования происходят в узле ответвления от Большого Енисея протоки Лопатной. В середине XIX века длина острова Лопатного была вдвое больше современной. К 1914 г. остров приобретает уже современные очертания, но на месте его размытого оголовка остается своеобразная мелководная «платформа». В период с 1866 г. по 1920 г. вершина острова отступила вниз по течению примерно на 4000 м (74 м/год), с 1920 г. по 1947 г.— на 300 м (11 м/год), с 1947 по 1977 г.— еще на 300 м (10 м/год). В то же время правый берег Большого Енисея (о. Коровий), как выпуклый берег излучины, наращивается. В 1866 г. о Коровий на карте отмечен не был (Лопатин, 1897); он формируется лишь к 1920 г. и с тех пор продолжает разрастаться в ширину: на 200 м за 1920—1947 гг., на 150 м за 1947—

1977 гг. Столь активные для условий дельты Енисея русловые переформирования в узле объясняются «навалом» потока на берег острова Лопатного под углом 30—90°, в результате чего происходит его интенсивный размыв, а поперечная циркуляция способствует перемещению наносов к середине русла.

Наличие у оголовка острова Лопатного обширной подводной отмели приводит к тому, что исток протоки фактически оказывается сильно смещенным вверх по течению, где он располагается в верхнем крыле излучины Большого Енисея, в области аккумуляции. Поэтому здесь формируется мелководный перекат, а протока Лопатная находится в неблагоприятных условиях для развития. Постепенное смещение излучины русла Большого Енисея вниз по течению усугубляет процесс ее отмирания.

Последний крупный узел разветвления второго порядка в восточной части дельты Енисея располагается у оголовка острова Турушина. Здесь от Большого Енисея отделяется вправо протока Лебяжья, представляющая собой подводную узкую бороздину среди обширных отмелей. В середине XIX века (Лопатин, 1897) истоки протоки Лебяжьей перекрывались песками. Деформации вышележащего узла разветвления привели к тому, что к началу XX века произошло ее развитие. Тогда же сформировались побочни, примыкающие к обеим берегам острова Турушина, а в зоне аккумуляции в верхнем крыле излучины Большого Енисея выше истока протоки Лебяжья начали образовываться острова Лебяжьи. К 1947 г. побочень у левого берега острова Турушина сместился вниз по течению на 160 м, к 1977 г. еще на 350 м. Смещение аккумулятивных гряд искривляет заход в протоку Лебяжью, и она, видимо, в дальнейшем будет отмирать.

В узле разветвления у острова Турушина располагается Турушинский перекат, наиболее лимитирующий судоходство в дельте. В многоводные годы происходит аккумуляция наносов на гребнях переката, грядовый рельеф становится более резким, минимальные глубины уменьшаются. В маловодные годы происходит размыв дна на перекате. Однако, как показывают промеры в маловодном 1970 г., относящемся к маловодному периоду 1964—1972 гг., при длительном преобладании низких половодий на Турушинском перекате происходит активная аккумуляция наносов. Это, видимо, связано с приспособлением всего русла Енисея к условиям меньшего стока воды, когда сокращаются размеры всех морфологических элементов русла. Глубины на перекатах наиболее быстро реагируют на подобные изменения. В целом устьевая часть Большого Енисея, расширенная и относительно мелководная, с активно переформировывающимся перекатом, находится в неблагоприятных условиях развития.

Таким образом, в восточной части дельты Енисея происходят как однонаправленные изменения, связанные с активизацией всего узла разветвления первого порядка, так и знакопеременные деформации, приводящие к временной активизации или отмиранию проток в узлах разветвления второго порядка. Сравнение картографического материала показывает, что изменение направленности процессов в узлах разветвления второго порядка происходит примерно через 50 лет.

ГИДРОЛОГО-МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ

Между различными гидравлическими и морфометрическими характеристиками водотоков дельты в процессе развития ее русловой сети складываются некоторые более или менее устойчивые соотношения, отображающие взаимодействие потока и русла (Михайлов, 1982). Такие соотношения, установленные теоретически или эмпирически, можно использовать для оценки направленности и интенсивности изменения водотоков (активизации или отмирания) путем сравнения фактических и осредненных устойчивых характеристик.

Гидролого-морфометрические зависимости для некоторых водотоков дельты Енисея были привязаны к уровням воды у в/п Селиваниха (с учетом времени добегания) и определялись для расходов воды в вершине дельты, кратных 10000 м³/с, во всем диапазоне изменения расходов воды в реке. Была оценена теснота полученных связей, позволившая установить, что наилучшая связь между расходами воды в водотоках и соответствующими морфометрическими характеристиками отвечает расходам в диапазоне 60—80 тыс. м³/с. Характерно, что руслоформирующие расходы воды, расчитанные по методике Н. И. Маккавеева для периода половодья по в/п Игарка (Чалов, 1979), равны 105 тыс. м³/с, т. е. в 1,5 раза больше, чем соответствующие морфологии русла, т. е. приспособленные к ней. Для дальнейшего анализа используются следующие гидролого-морфометрические зависимости, соответствующие расходам 70 тыс. м³/с:

$$\begin{aligned} w_0 &= 7{,}0Q^{5/6} \\ B_0 &= 25{,}0Q^{1/2} \\ h_0 &= 0{,}28Q^{1/3} \\ v_0 &= 0{,}142Q^{1/6} \\ I &= 6{,}3\cdot 10^{-5}Q^{-1/9} \end{aligned} \qquad (1)$$

При их расчете в качестве основных были приняты зависимости для площади поперечного сечения w_0 и глубины русла h_0, как имеющие наивысшие коэффициенты корреляции. Связи для ширины русла B_0 и скорости течения v рассчитаны по формулам $B_0 = w_0/h_0$ и $v_0 = Q/w_0$. Зависимость для уклона I_0 получена с помощью формулы Шези-Маннинга, коэффициент

шероховатости n по крупности донных отложений был принят равным 0,024.

Дополнительно из зависимостей системы (1) могут быть получены соотношение геометрического подобия

$$\frac{B_0^{2/3}}{h_0} = 30{,}5 \qquad (2)$$

и соотношение динамического подобия

$$\frac{v_0}{h^{1/2}} = 0{,}268. \qquad (3)$$

С использованием гидролого-морфометрических зависимостей и соотношений подобия могут быть выведены критерии направленности русловых процессов в водотоках дельты. Как показало применение таких критериев в ряде дельт (Михайлов и др., 1977), наилучшие результаты дают следующие:

для активизирующихся водотоков		для отмирающих водотоков	
$w < w_0$		$w > w_0$	
$v > v_0$		$v < v_0$	
$B < B_0$		$B > B_0$	
$h > h_0$		$h < h_0$	
$\frac{B}{h} < \frac{B_0}{h_0}$	(4)	$\frac{B}{h} > \frac{B_0}{h_0}$	(5)
$\frac{B^{2/3}}{h} < \frac{B_0^{2/3}}{h_0}$		$\frac{B^{2/3}}{h} > \frac{B_0^{2/3}}{h_0}$	

У активизирующихся водотоков фактические значения скорости течения v и глубины h, как правило, больше их устойчивых значений v_0 и h_0, снятых с гидролого-морфометрических зависимостей. Фактические значения площади сечения w, ширины B и отношения B/h у таких водотоков меньше устойчивых значений этих характеристик w_0, B_0 и B_0/h_0. Для отмирающих водотоков дельт характерны обратные соотношения.

Поскольку у активизирующихся и отмирающих водотоков фактическая ширина и глубина русла отличается от устойчивых в разную сторону, наиболее точными для определения тенденции развития дельтовых водотоков являются два последних критерия. Для условий дельты Енисея они могут быть представлены в виде

$$\frac{B}{h} \gtrless \frac{B_0}{h_0} = 89{,}3Q^{1/6}, \qquad (6)$$

$$\frac{B^{2/3}}{h} \gtrless \frac{B_0^{2/3}}{h_0} = 30{,}5. \qquad (7)$$

Сравнение фактических и устойчивых значений w, B, h, v и B/h позволило разделить рукава дельты на активизирующиеся и отмирающие (табл. 1).

Таблица 1

Направленность русловых процессов в водотоках дельты Енисея

| Название водотока | Количественные критерии | | |

Рис. 2. Изменение распределения расходов воды по рукавам дельты Енисея в узлах разветвлений А, Б, В, Г, Д (в процентах от поступающего в узел), в зависимости от расходов воды в вершине дельты. Цифры у кривых соответствуют номерам створов на схеме восточной части дельты Енисея (Е).

Таблица 2

Направленность русловых процессов в водотоках дельты Енисея

Рукав, протока	По методу			По совокупности методов
	тенденции	гидрометрическому	гидрологоморфометрическому	
Охотская	—	+	+	+ (локально)
Малый Енисей (исток)	—	—	—	—
Большой Енисей (исток)	—	—	+	—
Каменный Енисей (исток)	+	+	нет	+
Большой Енисей (ниже острова Песчаный)	+	+	нет	+
Судная	—	—	—	—
Чаяшная	+	+	+	+
Лопатная	—	—	—	—
Лебяжья	—	—	—	—
Большой Енисей (устье)	—	+	—	—

Примечание. Активизация водотока (+); отмирание (—); отсутствие информации (нет).

щади первичной дельтовой равнины составляла за всю историю ее развития не более 0,5 км²/год и в целом уменьшилась по мере увеличения дельты до 0,02 км²/год в настоящее время. Линейная скорость выдвижения дельты не превосходит теперь 10—30 м/год. Переход стока воды из одной системы основных рукавов в другую занимает тысячелетия. При этом наблюдается неуклонный рост значения и активности вторичных, собственно русловых процессов в изменении облика дельты. В настоящее время эти процессы преобладают.

Однако русловые переформирования в дельте Енисея также происходят очень медленно, что соответствует общей закономерности понижения интенсивности литодинамических процессов в дельтах рек арктической зоны Сибири (Коротаев и др., 1980). Средние скорости размыва берегов дельтовых островов редко превышают 2—3 м/год, лишь в наиболее активных узлах разветвления отмечаются скорости в 10 м/год (максимальные скорости размыва зафиксированы у оголовка острова Лопатного в конце прошлого века — 74 м/год — явно не показательны). Перераспределение стока между рукавами даже во второстепенных узлах разветвления более чем за 100 лет не наблюдается, а период смены тенденций активи-

зации и отмирания в связи с прохождением побочней составляет не менее 50 лет.

При общей малой активности крупных русловых форм перекаты, осложненные системой гряд различного ранга, весьма динамичны, чутко отзываются на все изменения стока воды в дельте. Общая тенденция к отмиранию устья Большого Енисея указывает на необходимость постоянного наблюдения за состоянием Турушинского переката, который находится в условиях, способствующих росту отметок дна. Ежегодно разрабатываемая на перекате прорезь в настоящее время обеспечивает необходимые для судоходства глубины, однако требуются ежегодные промеры на перекате для оперативного прогноза его деформаций.

При устойчивом переходе отметок дна выше необходимых для судоходства следует перенести судовой ход ниже островов Песчаных в протоку Чаяшную и устьевую часть Каменного Енисея. При этом в протоке Чаяшной, возможно, нужно будет провести дноуглубительные работы.

В настоящее время осуществляется некоторое регулирование стока Енисея водохранилищами в верхней части бассейна реки. Проектируются водохранилища в среднем и нижнем течении Енисея, которые приведут к значительной зарегулированности стока (Антонов, 1972). При этом уменьшатся руслоформирующие расходы в дельте и возрастает роль меженного стока в руслоформирующих процессах. Выявленные тенденции в значительной мере усилятся. В частности, ускорится активизация протоки Чаяшной и отмирание устьевой части Большого Енисея. В целом возрастут отметки дна на перекатах дельты. Сделанные оценки направленности процессов дельтообразования в устье Енисея необходимо учитывать при разработке практических мероприятий, связанных с дноуглублением, регулированием и территориальным перераспределением стока.

ЛИТЕРАТУРА

Антонов В. С. Возможные изменения гидрологического режима низовьев Енисея при зарегулировании стока.— Труды ААНИИ, т. 297, 1972.

Вилькицкий А. И. Материалы для изучения Обской губы и Енисейского залива, собранные в 1894—95 и 96 гг. под начальством подполковника Вилькицкого. СПб, 1900.

Гаррисон Л. М., Коротаев В. Н., Сидорчук А. Ю. Палеогеоморфологический анализ дельтовой равнины р. Енисей. Вестн. Моск. ун-та. Сер. геогр. 1981, № 6.

Иванов В. В., Гиляров Н. П. Режим нижнеенисейских перекатов, расположенных в зоне влияния моря.— Труды ААНИИ, т. 268, 1965.

Коротаев В. Н., Сидорчук А. Ю., Чалов Р. С. Литодинамика дельт рек севера Сибири.— Водные ресурсы. 1980, № 1.

Лопатин И. А. Дневник Туруханской экспедиции 1866 г.— Зап. Русск. геогр. общества, т. 28, 1897, № 2.

Михайлов В. Н. Гидролого-морфологические закономерности формирования речных дельт.— Вестн. Моск. ун-та. Сер. геогр. 1982, № 2.

Михайлов В. Н. и др. Динамика гидрографической сети неприливных устьев рек. М., 1977.

Чалов Р. С. Географические исследования русловых процессов. М., 1979.