



УДК 551.018

Изменение характеристик р. Ангары в нижнем бьефе Иркутской ГЭС в результате техногенного воздействия

Г. С. Мазур (mgs0536@mail.ru)

Аннотация. Выполнено исследование параметров неравномерного движения в центральной части нижнего бьефа Иркутской ГЭС по материалам топографических карт и русловых съемок р. Ангары на участке длиной 24 км. Определено изменение глубин, ширины, скорости течения, уклона водной поверхности, гидравлической шероховатости в зависимости от влияния гидротехнических сооружений, теплового загрязнения потока, карьерных и дноуглубительных работ. Рассмотренный участок отличается многорукавностью и высоким уровнем техногенного воздействия.

Ключевые слова: русловой процесс, техногенное воздействие, разветвление потока, тепловое загрязнение, пойменные протоки, основное русло.

Введение

Ангара в природном состоянии относилась к категории устойчивых рек, русло которой мало менялось столетиями. Основной причиной такого состояния были два фактора – природное регулирование стока оз. Байкал и устойчивое к размыву галечное дно.

Ситуация изменилась в послевоенные годы прошлого столетия, когда для развития населённых пунктов, строительства промышленных предприятий и обширной сети автомобильных дорог потребовались строительные нерудные материалы высокого качества и значительные объемы энергетических ресурсов, чем богата Ангара. Добыча гравия из русла приобрела такие размеры, при которых река уже не справлялась с восстановлением своего природного облика, и в короткие сроки начались необратимые русловые деформации. В конечном итоге это приведёт не только к изменению размеров русла и формы его поперечного сечения, но и к смене типа руслового процесса.

Характеристика участка исследований

Оценка изменений русла выполнена на участке реки длиной 24 км, верхняя граница которого находится в 42 км ниже плотины Иркутской ГЭС в районе г. Ангарска. Расчеты выполнены на основе русловых съемок в природном (1936 г.) и изменённом состоянии потока в период работы

Иркутской ГЭС (1990 г.) [2, 5]. В 1988–1990 гг. выполнялись последние сплошные русловые съемки русла р. Ангары по длине всего нижнего бьефа. В последние годы русловые съемки выполняются на коротких участках в крупном масштабе 1:2 000, 1:5 000, как правило, без обозначения урезов воды и только по длине переката в целях определения объемов дноуглубительных работ. Такие съемки непригодны для определения комплекса гидроморфологических характеристик, рассматриваемых в данной работе.

По особенностям развития русловых процессов и степени техногенного воздействия рассматриваемый участок можно разделить на три морфологических участка: верхний, средний и нижний (рис. 1).



Рис. 1. Деление р. Ангары на морфологические участки

Верхний участок в природном состоянии развивался по типу пойменной и русловой многорукавности. Для среднего участка характерен тот же тип руслового процесса, но участок отличается более высоким уровнем техногенного воздействия. Нижний участок характеризуется бифуркацией русла при почти равной водности рукавов (р. Ангара и Голуторовская протока). Меандрирование русла Ангары ограничено выходом скальных пород на правом берегу.

Факторы техногенного воздействия

1. Выборка гравия в русле и в пойменных протоках.
2. Карьерные работы на пойме. Перекрытие пойменных проток.
3. Дноуглубительные работы на перекатах.
4. Регулирование стока Иркутским гидроузлом.
5. Сброс тёплых сточных вод.
6. Продольные и поперечные дамбы. Полузапруды.
7. Спрявление меандрирующего русла.

Кратко рассмотрим возможное влияние каждого из перечисленных факторов на русло реки.

Любая выборка из основного русла или пойменных проток приводит к увеличению поперечного сечения потока, снижению уровня (просадке). При многорукавном русле возможно перераспределение стока между рукавами, обмеление одних и размыв других рукавов, уменьшение уклонов свободной поверхности и скоростей течения, заилению бывших карьеров.

Промышленные карьеры на пойме обычно защищаются дамбами, которые изменяют направление течения на пойме и в русловых протоках вблизи карьера, могут стимулировать развитие русловых и отмирание пойменных проток. Карьеры, перекрывающие пойменные протоки, вызывают перераспределение стока в рукавах русла.

Дноуглубительные работы на перекатах вызывают просадку уровня, если в течение длительного времени извлекаются большие объемы гравия. Снижение отметок переката при дноуглублении увеличивает глубины на гребне переката, уменьшает уклоны, скорости течения и транспортирующую способность потока по перемещению наносов.

Основное назначение любого гидроузла – это изменение природного гидрографа стока в соответствии с требованиями водопользователей. Обычно это выражается в заполнении водохранилища в периоды повышенной приточности и расходования воды в периоды пониженной водности. При малых запасах в водохранилище в нижний бьеф сбрасываются пониженные расходы воды, объем которых обеспечивает сохранение нормальных санитарных условий и требований судоходства. При низкой приточности, например, зимой сбросы превышают расходы до сооружения гидроузла. При сбросе высоких расходов воды в зимний сезон возможен размыв дна.

Нижний бьеф на приплотинном участке не замерзает, что вызывает образование шугохода и подъем уровня с затоплением прилегающей территории. Приплотинная полынья не доходит до рассматриваемого участка, но здесь также образуется полынья длиной несколько километров. Шуга сплавляется по течению и примерзает к ледоставу, образуя ледяную перемычку. Уровень резко повышается. Выше по течению по длине многокилометрового подпора происходит интенсивная аккумуляция взвешенных наносов. Разрушение ледяной перемычки вызывает деформацию дна ниже перемычки.

Вдольбереговые дамбы защищают берег от нежелательного размыва, но при искривлении русла усиливается размыв прикорневой части берега. Поперечные дамбы отклоняют поток от размываемого берега, но при этом возможен размыв противоположного берега. Полузапруды (шпоры) также должны отклонять поток от размываемого берега, однако они повышают турбулизацию потока. У оголовка шпоры образуется яма размыва, откуда размывтый грунт смещается вниз по течению.

Спрявление русла возможно на излучинах в различной стадии их развития. При свободном меандрировании оно существенно уменьшает длину потока, если спрямляемая излучина имеет сильно вытянутую форму, называемую языком. После спрямления увеличивается уклон потока, скорость течения и пропускная способность русла.

Сравнение очертаний русла в 1936 и 1990 гг.

Верхний участок

На верхнем участке сочетаются пойменная и русловая многорукавность. Пойма двухсторонняя, разновысотная. Правобережная пойма выше и намного короче поймы левого берега. Она ограничена коренным склоном долины с многочисленными распадками. Пойму левого берега образуют два крупных пойменных острова, разделённые протоками Еловая и Монастырская.

В природном состоянии до вмешательства человека русловой поток разделялся на многочисленные острова, протоки между которыми работали не только при высоких, но и при низких уровнях (рис. 2). К 1990 г. в русле остались только два крупных острова. Из них о. Красавец мало изменился, а о. Дикий стал уже в два раза. Он приобрёл форму, вытянутую по течению. Такое возможно при увеличении скорости течения.

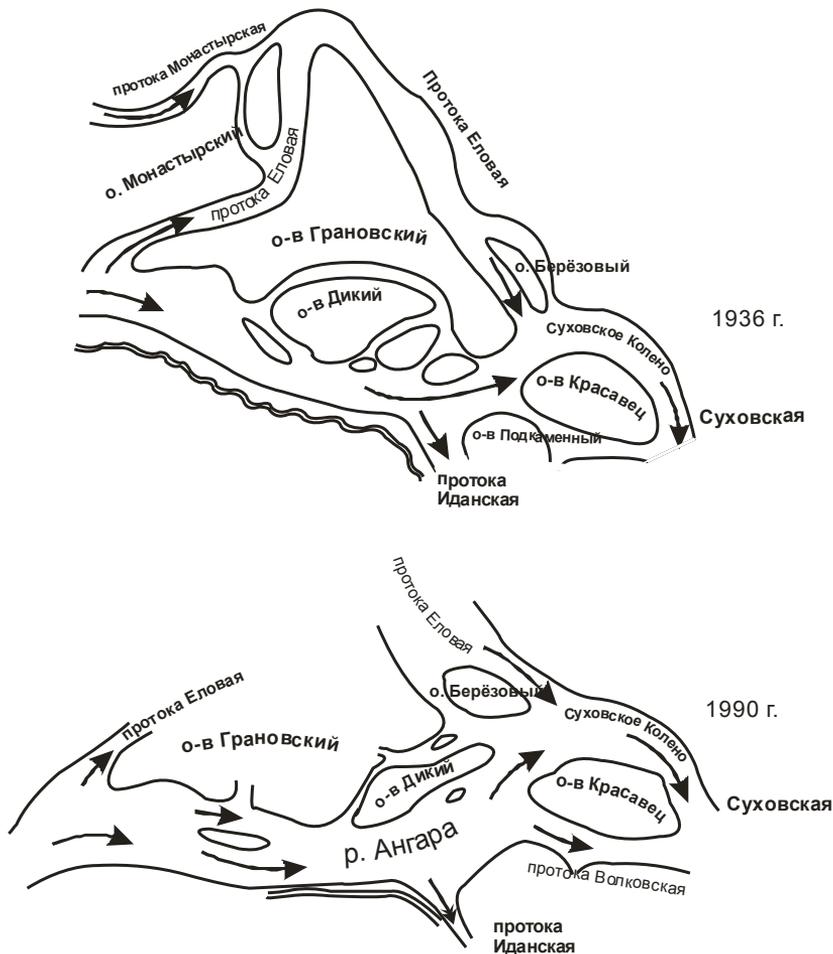


Рис. 2. Схемы русла на верхнем участке

Ширина протоки Еловая и остров в её устье претерпели значительные изменения после 1960 г. Ширина увеличилась в несколько раз в результате работы карьера. Вытянутая форма острова Берёзовый на выходе из протоки трансформировалась в овальную, что является показателем уменьшения скоростей течения, транспортирующей способности потока, увеличения аккумуляции наносов.

Ниже соединения проток Монастырская и Еловая в вершине изгиба находится водозабор ТЭЦ. Занесение протоки и уменьшение её расхода вынудило периодически выполнять расчистку русла Еловой протоки.

В 1936 г. протока Волковская была небольшой пойменной протокой. В настоящее время она превратилась в русловую протоку.

Более подробно характеристика процессов верхнего морфологического участка рассмотрена в работе [4].

Средний участок

Средний участок находится между островами Красавец и Большой (Никольский). Карта участка и его характеристика приведены в работе [4].

В 1971 и 1973 гг. были очень высокие сбросы в нижний бьеф, которые вызвали затопление поймы. На пойме работали более 20 проток (рис. 3).

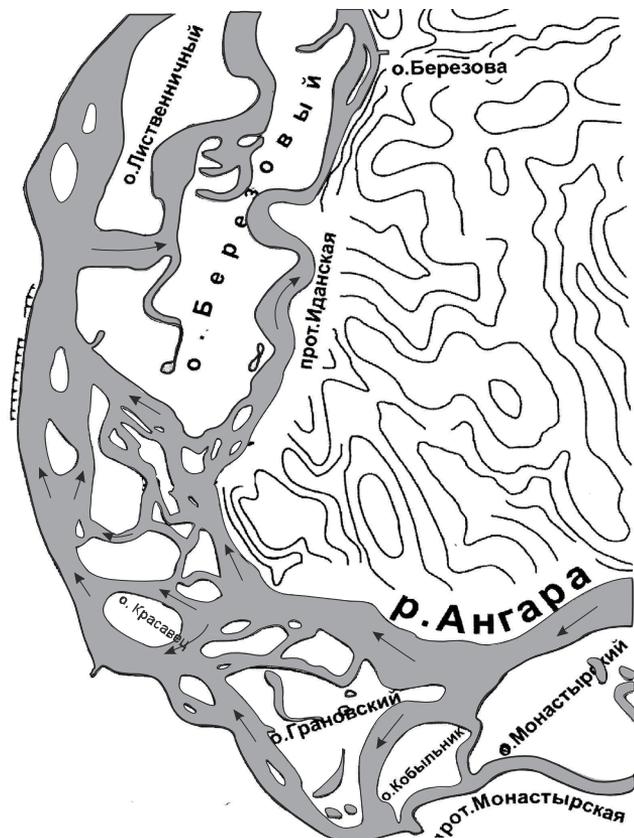


Рис. 3. Русло и пойменные протоки в 1973 г.

С конца 70-х до середины 80-х гг. на реках бассейна Ангары было глубокое маловодье. Минимальные расходы воды имели обеспеченность 95–97 %. Водоохранилище было сработано до уровня мёртвого объема. В нижний бьеф сбрасывались расходы воды, при которых глубины судового хода снизились до критических значений. Начались большие выборки гравия по судовому ходу, в протоках и русловых карьерах, что вызвало просадку уровня. В результате за период с 1981 по 1990 гг. суммарная просадка уровня по данным измерений на водомерном посту ст. Суховская достигла 65 см [2, 3]. Началось обмеление пойменных проток среднего участка. К середине 80-х гг. на пойме среднего участка остались только 3 протоки: Иданская, Лиственничная, Нижняя Лебяжья (рис. 4).

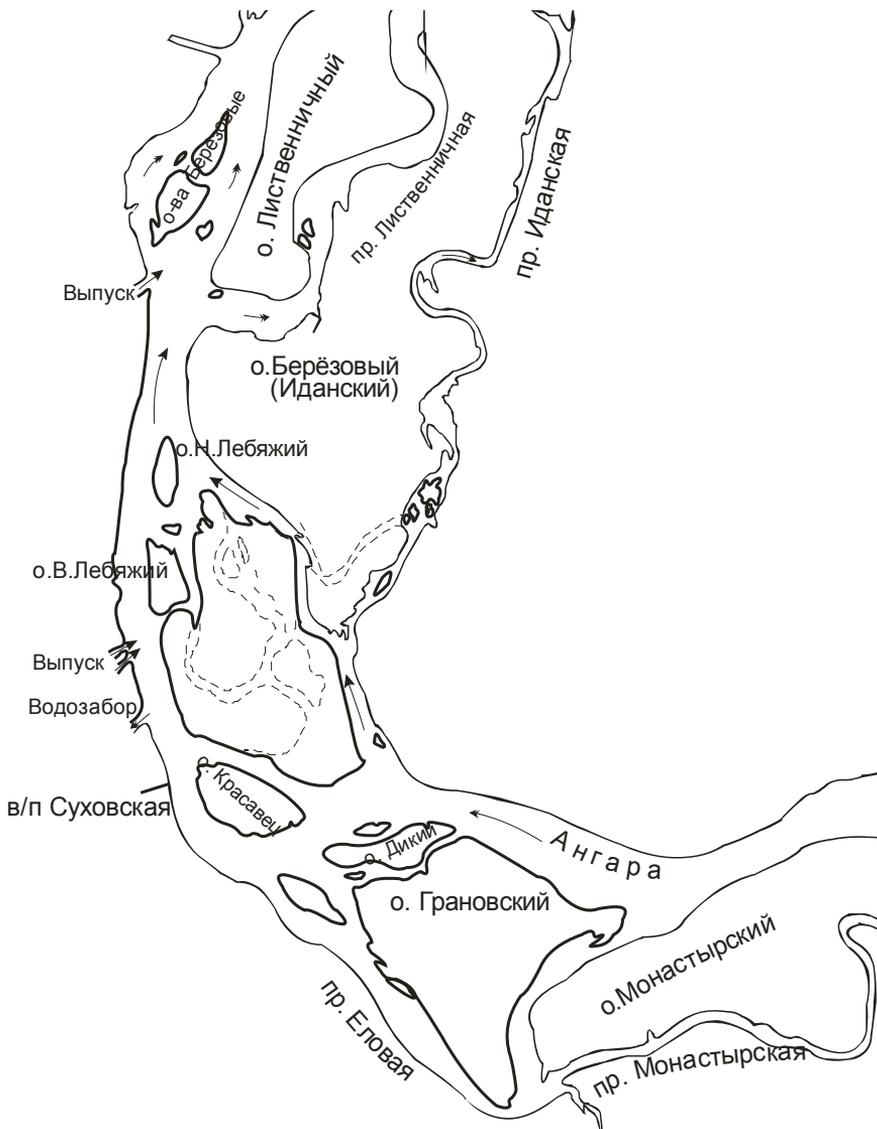


Рис. 4. Состояние русла в 1981 г.

В середине 80-х гг. на о. Иданский начал работать пойменный карьер. Добыча гравия производилась из русла протоки Верхняя Лебяжья. Гравий вывозился по протоке Нижняя Лебяжья. Истоки обеих проток были открыты карьером. В 1936 г. они отводили в р. Ангару часть расходов воды из Иданской протоки.

Русло р. Ангары от поста ст. Суховская до протоки Лиственничная имеет слабоизогнутую форму, что привело к подмыву левого берега. Поэтому в конце 80-х гг. было выполнено укрепление берега железобетонными кубами размером 1×1×1 м полосами шириной несколько метров и длиной до 6 м по профилю склона. Они продолжают в русле на длину 30–40 м в виде полузапруд.

Основное назначение полузапруд – сместить динамическую ось потока к правому берегу. По замыслу проектировщиков это должно дополнительно защитить левый берег от размыва и усилить размыв нижерасположенного переката Грязнуха. К сожалению, авторы проекта не учли циркуляционную структуру скоростного поля на изогнутом участке русла. Река внесла свои коррективы в предложенное решение. Судовой ход по-прежнему проходит ближе к левому, чем к правому берегу. При низких уровнях полузапруды представляют опасность для судов.

У концевых участков полузапруд образуются вихри, которые размывают дно и переносят размывтый грунт на перекат Грязнуха и в левый рукав под названием Берёзовая протока.

В 1936 г. на этом участке реки было два острова, которые разделили поток на два рукава (рис. 5). В обоих рукавах глубины превышали 2,5 м. На входе в правый рукав его ширина составляла 300 м, на выходе – 180 м. Ширина левого рукава мало изменялась по длине и составляла 200 м. Движение воды между островами было направлено из правого в левый рукав.

В начале 60-х гг. в левом рукаве разветвления началась добыча песчано-гравийной смеси. Максимальная производительность карьера была достигнута в 1978 г.

К 1990 г. ширина русла с карьером увеличилась в 1,5 раза по сравнению с руслом в 1936 г. от 560 до 860 м. При этом ширина судового хода с наибольшими глубинами уменьшилась от 200 до 140 м (см. рис. 5).

Осерёдки в протоке Берёзовая у левого берега карьера имеют вытянутую форму, что указывает на увеличение скоростей течения по длине протоки. На выходе из карьера формируется косоструйность, поэтому ухвостья осерёдков и о. Нижний Берёзовый размывты. Остров Верхний Берёзовый, который находится в области подпора от поперечной дамбы на входе в протоку, имеет округлую форму.

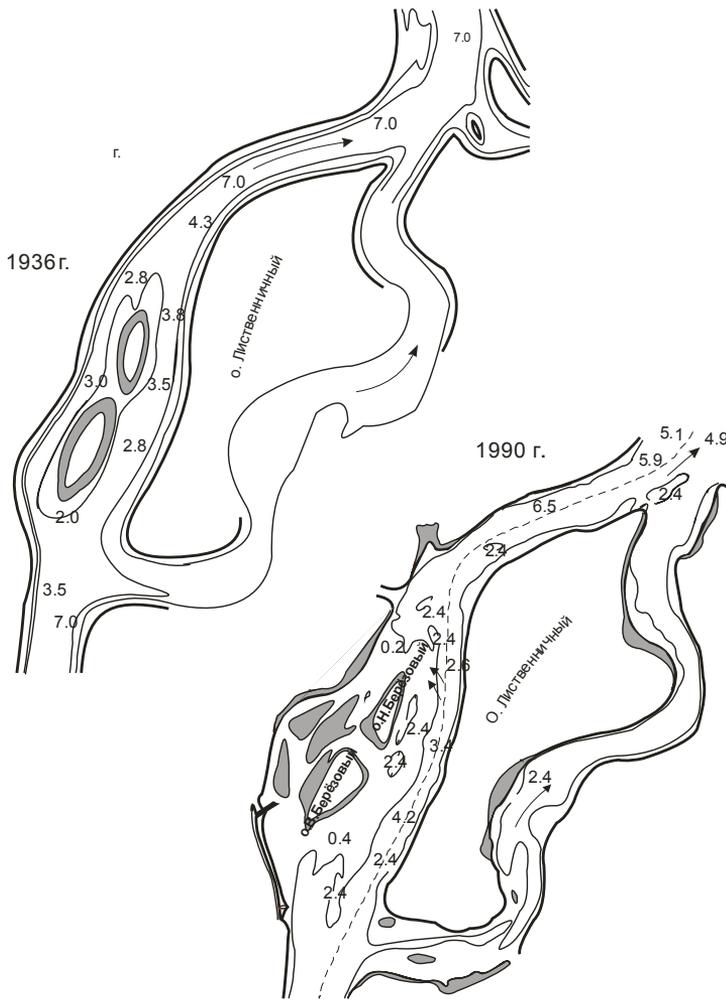


Рис. 5. Русло на карьерном участке среднего морфологического участка в 1936 и 1990 гг.

Русло перед входом в карьер и в центральной части Берёзовой протоки заносится. Размывается узкая полоса протоки вдоль левого берега. Всё же глубины в протоке намного меньше, чем были в 1936 г. В естественном состоянии ширина отмели вокруг островов вместе с островами равнялась 300 м. К 1990 г. отмель достигла 700 м.

Левый берег протоки имеет очертание, характерное для излучины. При затоплении осередков с повышением расходов воды течение в протоке будет таким же, как в излучине, а это означает, что пляж в центральной части протоки объединит осередки в единый массив, увеличение площади которого вызовет дополнительный размыв левого берега протоки.

Основное русло Ангары проходит вдоль о. Лиственничный, который также размывается. В период с 1936 по 1990 гг. ширина острова в цен-

тральной части уменьшилась на 100 м. За тот же период створ с наименьшей шириной сместился вниз по течению на 150 м. За счет размыва левого берега площадь острова уменьшилась на 20 %.

В основном русле между островами Берёзовые и Лиственничный находится пережат Грязнуха, отличающийся более высокой заносимостью, чем каждый из остальных пережатов Ангары от Усть-Балея до Суховской. Пережат длиной 1300 м ежегодно расчищается.

В 3,5 км выше пережата в Ангару поступают теплые сточные воды. Почти ежегодно ниже сброса формируется полынья, в которой образуется шуга. Зашугованность русла может достигать 60 %. У кромки неподвижного ледостава почти ежегодно образуются зазоры. При этом уровень поднимается на высоту более 3 м. В январе 1985 г. был самый высокий зазорный уровень, который превысил уровень летней межени на 3,5 м. В предледоставный период во время зазоров и подвижки льда выше пережата Грязнуха происходят навалы льда на левый берег. Неоднократно происходило разрушение льдом оголовка выпуска сточных вод ТЭЦ.

Дноуглубительные работы выполняются на пережате с 1970 г. До 1990 г. объемы дноуглубительных работ на пережате Грязнуха составили 473 тыс. м³. Из них в многоводные 1971 и 1973 гг. выборка равнялась всего 16,0 тыс. м³. В маловодный период с 1974 по 1983 гг. объемы работ на пережате увеличились почти в 10 раз (152 тыс. м³). В следующий период при повышенной водности (1985–1990 гг.) выборка превысила объем предыдущего периода в 2 раза (305 тыс. м³). Сложилась интересная ситуация. В период катастрофических сбросов через плотину ГЭС в 1971 и 1973 гг. объем работ был минимальным, а в следующий период повышенной водности (1985–1990 гг.) потребовался большой объем дноуглубительных работ. В период с 1970 по 1983 гг. в среднем ежегодно выполнялись работы в объеме 17 тыс. м³. После 1984 г., когда начал работать Иданский карьер на пойме и был укреплен левый берег Ангары, объем работ увеличился в 3 раза.

Анализ факторов деятельности человека на пережате Грязнуха приводит к следующим заключениям.

1. На пережате происходит повышенное отложение мелкого песка, илистых и глинистых частиц диаметром менее 1 мм из-за более высокой, чем в природном состоянии, температуры воды в течение всего года. Интенсивность оседания взвешенных частиц, которые транспортируются в толще потока, зависит от вязкости жидкости. При повышении температуры вязкость уменьшается, что увеличивает объемы аккумуляции частиц.

2. Мелкие частицы поступают из карьера Иданский, откуда вывозятся песчано-гравелистые частицы, и переносятся потоком до карьера в протоке Берёзовая.

3. Зимой выше карьера частицы оседают в зоне подпора от временной ледовой перемычки. После ее разрушения они оседают в застойных зонах в протоке Берёзовая.

4. Иданский карьер перекрыл пойменные протоки, что произошло после 1981 г. Перестали работать две Лебяжьи протоки, что привело к увели-

чению расходов русла Суховское Колено и Волковской протоки. Начал размываться Суховской пережат, продукты размыва транспортировались до пережата Грязнуха. С 1971 по 1982 гг. (11 лет) дноуглубительные работы были менее 21 тыс. м³, за 6 лет после 1982 г. – 111 тыс. м³.

5. Увеличение объемов дноуглубительных работ именно после 1981 г. объясняется проявлением действия трех факторов: карьерные работы на верхнем и среднем участках, перекрытие пойменных проток Лебяжьи, укрепление левого берега Ангары и строительство в русле полузапруд.

6. Уменьшение объемов дноуглубительных работ в период сброса высоких расходов воды можно объяснить только естественным размывом русла при повышенных скоростях течения в паводок.

Из семи факторов техногенного воздействия на среднем участке действуют шесть факторов.

Нижний морфологический участок

Голуторовская протока

Нижний участок включает Никольское разветвление, состоящее из двух почти одинаковых по водности водотоков. Это основное русло р. Ангары и пойменная протока Голуторовская. Длина участка 10 км. Русловой процесс р. Ангары на этом участке относится к типу ограниченного меандрирования. Вдоль большей части правого берега перемещение излучин ограничено скальным берегом. Для протоки Голуторовская характерно свободное меандрирование (рис. 6).

Центральную часть нижнего участка занимает о. Большой (Никольский). Его длина от 6,75 км в 1936 г. уменьшилась до 6,4 км в 2008 г. Наибольшая ширина острова 2,6 км мало изменилась за 70 лет. Высота берегов изменяется от 2 до 4 м.

Протока Голуторовская проходит вдоль левого берега острова. В середине протоки была вытянутая петля, которая называлась Голуторовский Язык. Длина протоки в 1936 г. была 12,9 км. В середине 60-х гг. петля спрямилась в результате нарушения целостности растительного и почвенного покрова поймы. Она стала короче на 4 км. Через 10 лет ее длина была искусственно уменьшена ещё на 1,8 км строительством канала, который разрезал о. Пежемский на два острова. До этого протока огибала о. Пежемский, образуя излучину. Таким образом, в 1980 г. протока сократилась до 7 км. К 2008 г. протока удлинилась до 8 км (рис. 7).

С 1946 по 1962 гг. в средней части протоки выполнялись стационарные режимные наблюдения на посту р. Ангары (протока Кривая) – г. Ангарск. Наибольшие глубины в створе наблюдений гидропоста достигали 6 м. Скорости течения изменялись от 0,9 до 1,8 м/с. Зимой в период ледостава глубина потока увеличивалась до 8 м. Выше створа поста всю зиму стоял подпор.

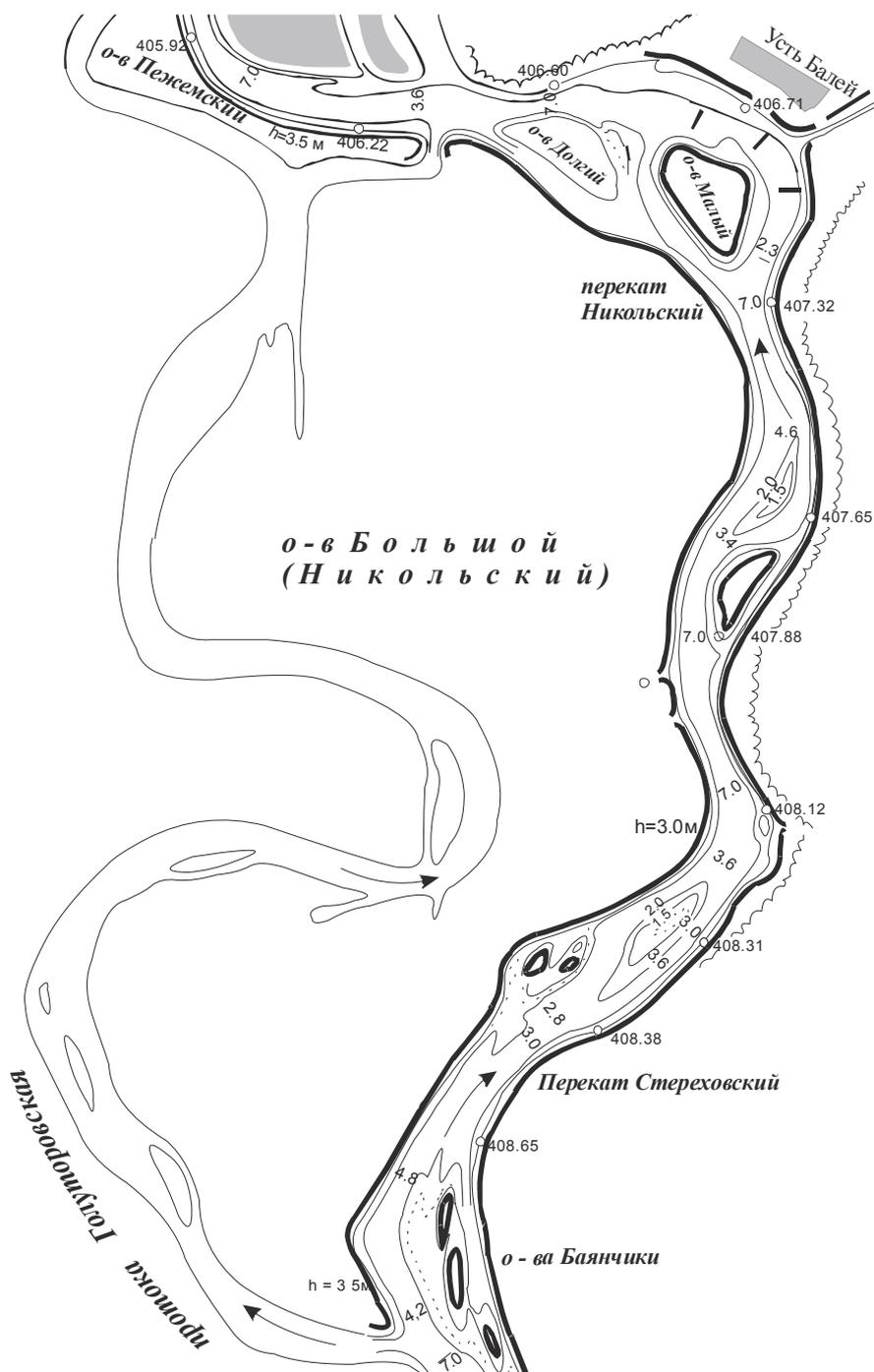


Рис. 6. Нижний морфологический участок в 1936 г.

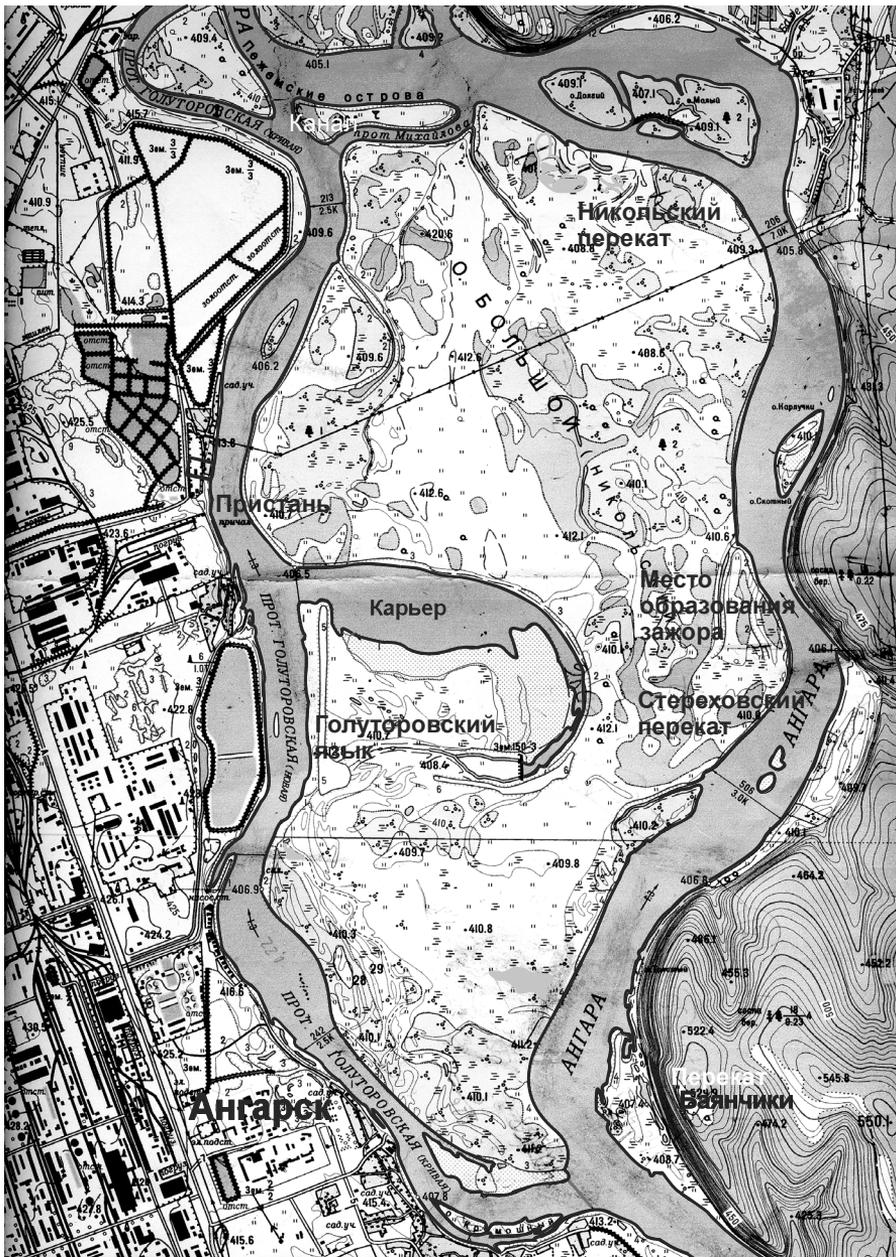


Рис. 7. Нижний морфологический участок в 2008 г.

Уклон протоки в 1936 г. составлял 0,23–0,26 м/км при низких и 0,3–0,32 м/км при высоких уровнях. В 2008 г. он увеличился до 0,39 м/км. В 1981 г. уклон поверхности в истоке протоки на длине 900 м был близок к нулю, поэтому здесь сформировалась обширная зона аккумуляции наносов. Глубины верхней половины протоки не превышали 2,4 м. На входе в протоку образовались острова Капитанские и побочень у правого берега. Длина отмели вокруг острова составляла 800 м, ширина – 200 м.

В месте спрямления Голуторовского Языка оба берега протоки были укреплены бетонными плитами и дамбой высотой 5 м. На пойме в Голуторовском Языке началась добыча гравия в карьере.

Выше спрямления находится водозабор, ниже – сброс теплых стоков. Между ними на левом берегу расположен отстойник длиной 1100 м и шириной 300 м, огороженный по периметру дамбой высотой 3 м. В месте спрямления излучины поток ограничен двумя дамбами. Уклон потока на этом участке достигает 0,61 м/км, что, естественно, увеличивает размыв дна и вызывает просадку уровня. Уклон на последних двух километрах в канале увеличивается до 0,69 м/км.

При высоких уровнях выше зоны стеснения потока дамбами формируется кривая подпора, что уменьшает уклон от водозабора до истока. Уклон снижается до 0,20 м/км и менее.

До 1980 г. протока была судоходной. Судоходные глубины поддерживались дноуглублением. С 1970 по 1980 гг. объем работ составил 121 тыс. м³. В следующее десятилетие он сократился в 10 раз. Глубины протоки уменьшились до двух и менее метров. В результате дноуглубительных работ глубины к 1990 г. были увеличены до 2,5 – 3,5 м. Судоходные глубины поддерживаются только ниже карьера на последних четырех километрах от устья до пристани.

В конце 70-х гг. в истоке протоки образовался пляж у правого берега и острова Капитанские в середине протоки. Очертания пляжа соответствуют форме карьера, который был разработан на пойме в период с 1936 по 1950 гг. и вызвал просадку уровня 28 см выше по течению в истоке Лиственничной протоки. Через 10 лет побочень превратился в о. Крешомный, а от Капитанских островов осталась узкая коса с затонской частью саблевидной формы. Из этой косы к 2008 г. у левого берега образовался остров длиной 400 м. Побочень у правого берега длиной 450 и шириной 100 м дошел до истока протоки (см. рис. 7).

Обмеление Голуторовской протоки произошло в 80-е гг., т. е. спустя 40 лет, в результате не только разработки карьера, но также двойного спрямления протоки и возведения дамб обвалования.

Река Ангара на нижнем участке

Река Ангара на нижнем участке является правым рукавом Никольского разветвления. На протяжении 6,5 км она имеет однорукавное извилистое русло, перемещение которого в долине ограничено скальными берегами правого склона.

Ангара пересекает три переката: Баянчики, Стереховский, Никольский. Наибольшая ширина русла на перекатных участках в 1936 г. составляла соответственно 660 м, 580, 380 м. Через 75 лет ширина перекатов изменилась. На перекатах Баянчики и Стереховский она увеличилась до 700 м в результате карьерных работ. Кроме того, на перекате Стереховский, где формируются наиболее мощные зажоры, увеличение ширины вызвано размывом русла при прорыве ледяной перемычки, которая образуется из шуги, примёрзшей к нижней поверхности льда. Уровни при зажорах могут

подниматься на 3–4,5 м, частично затопляя о. Никольский. Шуга из русла Ангары поступает в Голуторовскую протоку и забивает ее русло на 50–60 %. Постепенно теплые сточные воды Голуторовской протоки размывают шугу. Прорыв ледяной перемычки вызывает размыв дна в суженном русле Ангары ниже Стереховского переката.

Ниже Никольского переката поток разделяется на два рукава, образуя Усть-Балейское разветвление.

В 1936 г. на Усть-Балейском разветвлении шириной 960 м было два крупных острова Долгий и Малый, разделённых протокой. Движение воды в протоке происходило из левого в правый рукав. За счет увеличения водности правого рукава глубины в его устье были такими же, как в русле Ангары. В правом рукаве, начиная с 1960 г., эпизодически выбирался гравий. Разрабатывались острова Долгий, Малый, Кочка.

В 70-е гг. судовой ход был перенесён в левый рукав разветвления (Никольский рукав). Для увеличения расходов рукава была построена продольная дамба, которая соединила острова Долгий и Кочка. Дамба перекрыла поперечный рукав, через который вода уходила из левого рукава. Это уменьшило расходы правого рукава и скорости течения в нем, усилило занесение рукава. Острова соединились обширными мелями между ними.

В 1936 г. наибольшая глубина на выходе из правого рукава была 7 м, в 1978 г. – 4,4 м, в 1990 г. – 4 м. В последние годы стала уменьшаться ширина рукава. Вдоль вогнутого берега рукава образовалась обширная отмель шириной 200 м с глубинами менее 0,5 м. К 2008 г. прибрежная часть отмели превратилась в саблевидный осередок высотой около 1 м (см. рис. 7).

Гидравлические расчеты потока

Русловые деформации в результате воздействия на поток природных и техногенных факторов проявляются в изменении скоростей течения, уклонов водной поверхности, размывов дна, изменения глубин и расходов в русле. Количественно оценить масштабы этих изменений можно в результате гидравлических расчетов потока.

Методы гидравлического расчета параметров потока

На рассматриваемых морфологических участках существует неравномерное движение. Для его расчета предложено несколько методов, требующих данных о глубинах потока или отметках дна, сведений о гидравлической шероховатости, задания расхода в начальном или конечном створе расчетного участка, а также отметки уровня. По известной отметке в начальном створе рассчитывается отметка и глубина в конечном створе, уклон потока. Расчет выполняется методом последовательных приближений [7].

В данном случае решение осложняется тем, что поток в основном русле имеет переменный расход, величина которого зависит от водности пойменных протоков и рукавов русла. В зависимости от направления течения к руслу или от него протоки или рукава могут увеличивать или уменьшать

его расход. Для такого варианта предложены специальные методы расчета. Простейший из них – расчет расходов при делении потока на два рукава (бифуркация). Разработана система уравнений, решение которой позволяет получить расходы в рукавах, не выполняя последовательных приближений [6].

Более сложной является задача расчета многоузлового разветвления, когда число узлов больше двух. На среднем и верхнем морфологических участках преобладает именно такой тип разветвления потока. В каждом узле должно быть равенство суммы расходов притока к узлу расходам оттока из него.

Особенностью расчета в данном случае является отсутствие морфометрических характеристик пойменных проток, которые необходимы для традиционного метода расчёта. Поэтому при отсутствии измерений в протоках или рукавах русла расходы воды в них определялись по разности расходов выше и ниже створов изменения водности.

Длина потока основного русла разбивается на расчетные участки, в пределах которых выполняется условие малых изменений расхода, ширины и глубины русла, гидравлической шероховатости и уклона свободной поверхности. По длине расчетного участка может быть от одного до нескольких расчетных створов.

Определение расходов воды в каждом створе участка выполнен по формуле Шези

$$Q = wC\sqrt{hI}, \quad (1)$$

в которой параметр Шези C находится по зависимости Маннинга

$$C = \frac{1}{n} h^{1/6}. \quad (2)$$

В формулах приняты следующие обозначения переменных: w – площадь поперечного сечения потока в створе, m^2 ; h – средняя глубина потока, m ; I – уклон свободной поверхности; n – гидравлическая шероховатость.

Расчеты поперечных сечений выполнены по глубинам, определенным от проектного судоходного уровня.

Отметки, просадки, уклоны свободной поверхности

Первая сплошная русловая съемка р. Ангары от истока реки до г. Братска была выполнена в 1936 г. в связи с составлением лоцманской карты [5]. Отметки свободной поверхности определялись в системе абсолютных высот над уровнем Балтийского моря (Кронштадский футшток). В начале 40-х гг. была выполнена нивелировка I класса для уточнения отметок с учетом разницы высоты уровней Балтийского и Японского морей. При этом уточнялись отметки реперов и нулей графиков всех постов наблюдений государственной сети гидрометслужбы страны. После 1945 г. все высотные отметки пунктов наблюдений были приведены к единой сис-

теме высот над нулём Кронштадского футштока в Балтийской системе отсчета (БС). Съёмка 1936 г. выполнялась в системе отметок нивелирования 1908–1931 гг. Она отличается от современной системы высот на величину поправки, которая изменяется по территории страны. В данном случае для района г. Ангарска поправка составляет плюс 65 см [1], поэтому измеренные отметки 1936 г. были приведены к современной системе отметок БС.

На рисунках 4 и 5 показаны отметки при нивелировании урезов в 1936 г. Отметки поверхности определялись через каждый километр и даже на более коротких участках. К сожалению, на современных топографических картах расстояния между точками урезов такого же масштаба съёмки 1:25 000 намного больше и нивелирование поверхности выполняется один раз за 20 и более лет. На лоцманских картах после 1950 г. вообще отсутствуют сведения об отметках свободной поверхности.

Сравнение отметок свободной поверхности во времени и пространстве позволяет оценить тенденцию изменения русла.

Изменение отметок свободной поверхности (рис. 8) показывает, что отметки поверхности в 1936 г. БС превышают отметки современного состояния реки. Следовательно, поток размывает русло или его поперечное сечение искусственно увеличивается в русловых карьерах, что вызывает снижение уровня (просадку). Если учесть, что по дну могут быть проложены коммуникации, трубопроводы, выпуски сточных вод или каналы водозаборов, подобное развитие процессов внушает опасение в целостности или нормальном функционировании этих сооружений.

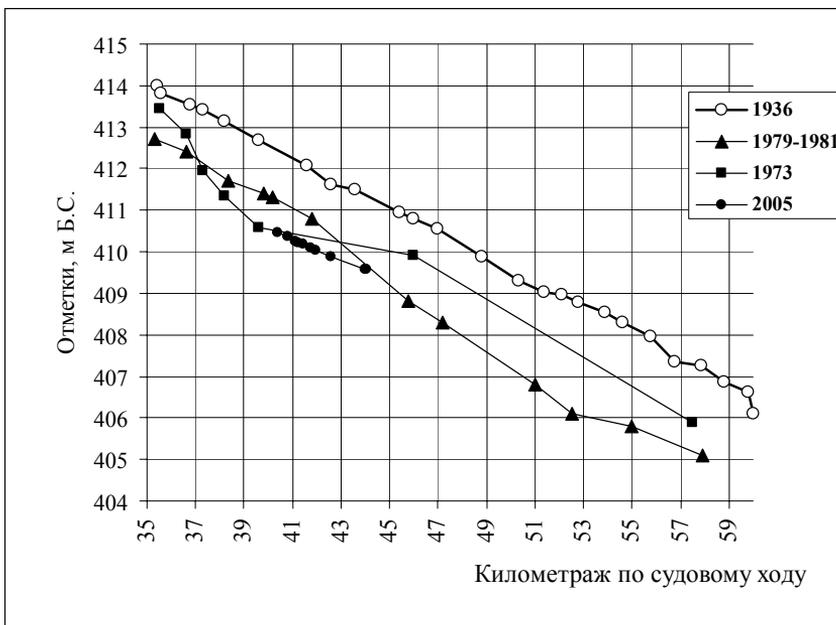


Рис. 8. Изменение отметок свободной поверхности по длине Ангары

В 1973 г. после сброса в нижний бьеф чрезвычайно высоких расходов воды паводков летнего периода произошел значительный размыв дна на верхнем участке. Между 39 и 40 км отметки снизились на 2 м. Это очень важное обстоятельство, так как дает основание считать, что паводки 1971 и 1973 гг. положили начало снижению глубины затопления поймы и обмелению пойменных проток верхнего морфологического участка. На двух остальных участках уровни также снизились, но только на 1,0–1,5 м.

В 2005 г. выполнялась русловая съёмка большей части среднего морфологического участка в связи с реконструкцией выпуска сточных вод. Руководила работами автор данной работы. Был выполнен необходимый объем работ для назначения высотных отметок выпуска, оценки русловых процессов и скоростного поля потока, пространственного распределения крупности донных отложений. Результаты нивелирования водной поверхности приведены на графике (см. рис. 8).

К 2005 г. по сравнению с 1936 г. в пределах среднего участка уровни снизились на 2 м. Произошел размыв дна. После 1981 г. высокие расходы сбросов (более $3500 \text{ м}^3/\text{с}$) через плотину Иркутского гидроузла были в 1985, 1994, 1995, 2001 гг. В 1995 г. расходы около $4000 \text{ м}^3/\text{с}$ сбрасывались в нижний бьеф в течение нескольких недель. В 2001 г. сформировался высокий паводок на р. Иркут. В июле максимальный расход р. Иркут составлял $3300 \text{ м}^3/\text{с}$. Сброс через турбины ГЭС был невысоким ($1330 \text{ м}^3/\text{с}$). Суммарный расход на пике паводка был равен $4630 \text{ м}^3/\text{с}$. Поэтому основной причиной размыва русла и снижения отметок свободной поверхности после 1981 г. можно считать повышенные сбросы ГЭС и высокие расходы р. Иркут. При прохождении высоких паводков на Иркуте в Ангару ниже гидроузла поступает большой объем наносов. Тем самым частично снижается дефицит наносов в нижнем бьефе гидроузла.

Измерения 1979–1981 гг. показали, что снижение отметок свободной поверхности распространилось от середины среднего участка до конца нижнего участка. Наибольшее падение уровней соответствует середине нижнего участка, где оно достигло 2,55–2,65 м.

Сопоставление отметок поверхности потока за два года съёмки позволяет оценить изменение просадок уровня в пространстве (табл. 1).

По данным 1981 г. наименьшие суммарные просадки характерны для верхнего участка, где они в среднем составляют 1,25 м. Здесь преобладают аккумулятивные процессы. Такие же просадки были в верхней половине среднего участка до протоки Лиственничная.

В конце среднего участка ниже истока протоки Лиственничная просадки увеличились до 2,15 м в результате разработки руслового карьера, дноуглубительных работ и естественного размыва русла в годы с чрезвычайно высокой водностью.

Таблица 1

Снижение уровней в период с 1936 по 1981 гг.

Расстояние по судовому ходу, км	Просадка, м	Морфологический участок	Примечания	Расстояние по судовому ходу, км	Просадка, м	Морфологический участок	Примечания	
35,0	1,35	Верхний		49,0	2,25	Нижний	Пережат Баянчики	
36,0	1,25			50,0	2,25			
36,5	1,25			Пр. Еловая	51,0		2,25	Пережат Стереховский
37,0	1,35				52,0		2,55	
38,0	1,25				52,5		2,65	
38,5	1,25			Пр. Иданская	53,0		2,65	
39,0	1,25			Пережат Суховской	53,4		2,55	Пережат Никольский
39,5	1,25				54,0		2,55	
40,5	1,25				54,2		2,45	
41,0	1,25				55,0		2,35	
41,2	1,25	Средний	Выпуск теплых стоков	55,5	2,25	Усть-Балейское разветвление		
42,0	1,25			56,0	2,05			
43,0	1,35			56,5	2,05			
43,5	1,65		Начало пр. Лиственничная	57,0	2,05			
44,0	1,65		Пережат Грязнуха	58,0	2,05	Голуторовский канал		
45,0	1,75			59	2,05			
46,0	2,05		Однорукавное русло ниже разветвления		48,8	2,25	Пр. Голуторовская	
47,0	2,25							
48,0	2,25							

Наибольшие просадки сформировались в однорукавном русле нижнего участка на перекатах Стереховский и Никольский, где они составляют 2,55–2,65 м. Здесь дополнительным фактором является образование зажоров и прорыв временной ледяной перемычки. Распространение волны прорыва вызывает размывы дна, особенно на участках сжатия потока ниже переката Стереховский.

Выполнены расчеты средних уклонов на трех морфологических участках (табл. 2).

Уклон верхнего участка не отличался от уклона потока в природном состоянии.

Таблица 2

Средние уклоны свободной поверхности

Расстояние по судовому ходу лоцманской карты 1994 г., км	1936 г.	1979 г.
	Уклоны, м/км	
35–40 (верхний участок)	0,30	0,30
40–49 (средний участок)	0,29	0,44
49–58 (нижний участок)	0,30	0,23
35–58 (все три участка)	0,30	0,34

Уклон на среднем морфологическом участке увеличился на 46 %. В результате размывов верхнего участка в 1973 г. размывтый грунт осел в верхней половине участка. За 6 лет после 1973 г. наибольшие массы отложений скопились по длине 41–42 км. Ниже 42 км, где производились дноуглубительные работы, уровень снизился (см. рис. 8). За перекатом Грязнуха произошел размыв однорукавного русла с просадкой уровня до конца участка.

Уменьшение уклонов на нижнем участке вызвано особенностью транспортирования наносов по его длине. Большая часть участка занята перекатами с увеличенными площадями сечений потока после карьерной добычи гравия, что вызывает просадки уровня и уменьшение уклона поверхности ниже по течению. В высокую водность на перекатах оседают наносы, которые повышают отметки их гребней и создают подпоры выше перекатов с уменьшением уклонов свободной поверхности. Поэтому не удивительно, что в однорукавном русле нижнего участка произошло уменьшение уклонов на 23 %. Ниже двух перекатов в сужении уклон потока увеличивается, дно размывается не только в осенне-зимний, но и в летний период с выносом наносов в Усть-Балейское разветвление.

По измерениям 1936 г. при среднем уклоне 0,30 м/км уклоны на отдельных небольших по длине локальных участках изменялись от 0,09 до 0,60 м/км.

Уклоны 1979 г. использованы в расчётах расходов 1990 г. с корректировкой на возможное их изменение в результате прохождения высокого паводка 1985 г. и влияния гидротехнических сооружений, построенных после 1981 г. Поэтому расчеты по глубинам 1990 г. выполнялись несколько раз при задании различных соотношений уклонов, гидравлической шероховатости и расходов.

При известном уклоне свободной поверхности из формул Шези и Маннинга (1, 2) получается выражение для гидравлической шероховатости в виде

$$n = \frac{h_{cp}^{0,67} \cdot i^{0,5}}{v},$$

где h_{cp} – средняя глубина потока в створе; i – уклон поверхности; v – скорость течения.

Поскольку уклон связан с шероховатостью, в данной работе по результатам расчетов расходов воды 1936 г. получено отношение этих параметров, которое зависит от скорости и глубины,

$$\frac{v}{h_{cp}^{0,67}} = \frac{i^{1/2}}{n}.$$

Среднее значение отношения составляет 0,67, максимальное – 0,82, минимальное – 0,45. Минимальное значение соответствует участкам при значительном расширении потока на перекате, максимальное – резкому уменьшению ширины ниже переката.

В 90 % случаев величина отношения между уклоном и шероховатостью изменяется в пределах от 0,6 до 0,72. При расчетах расходов 1990 г. уклон и шероховатость задавались таким образом, чтобы их соотношение находилось в этих пределах.

Дополнительно использован график изменения удельных расходов воды по данным 50 створов (рис. 9).

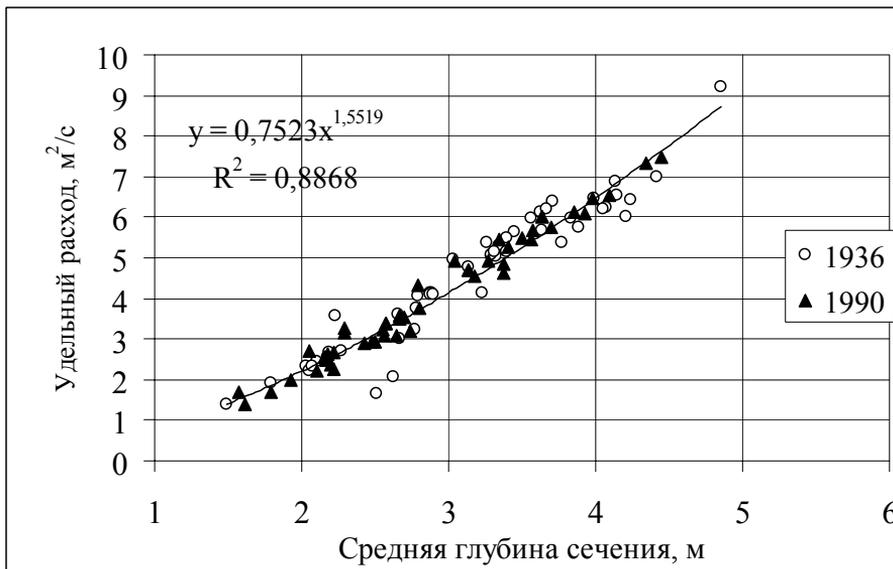


Рис. 9. Удельные расходы р. Ангары на исследуемом участке

Основным достоинством зависимости является возможность получения расходов без данных о шероховатости и уклона. Сначала график был построен по рассчитанным расходам 1936 г. С его помощью в первом приближении были оценены расходы по всем расчётным участкам, на основании которых назначались уклоны поверхности и гидравлическая шероховатость. Наконец, третье условие, которое надо было выполнить – это получение расходов пойменных проток с минимальной погрешностью разности расходов на входе и выходе из проток. При этом выполнялась увязка пропускной способности всех проток. Приходилось неоднократно коррек-

тировать уклоны и шероховатость основного русла по длине расчетных участков. По окончании серии расчетов удельные расходы 1990 г. были объединены с расходами 1936 г. в одну совокупность (см. рис. 9).

Изменение гидравлических характеристик р. Ангары

На верхнем морфологическом участке выделено 5 расчетных участков от 35 до 40,4 км судового хода, на среднем – 10 (44–49 км) и на нижнем – 7 участков (49–57 км). Осреднение параметров для трёх морфологических участков приведено в табл. 3.

Таблица 3

Осреднённые параметры трёх морфологических участков

Годы	Уклон, м/км	Площадь, м ²	Ширина, м	Гидр. шерохова- тость	Средняя глубина, м	Средняя скорость, м/с	Расход, м ³ /с
Верхний морфологический участок							
1936	0,30	839	272	0,028	3,12	1,37	1183
1990	0,34	1013	334	0,027	3,07	1,407	1401
Изменения, %	10,4	20,7	22,8	-5,5	-1,7	2,5	18,4
Средний морфологический участок							
1936	0,28	1005	281	0,026	3,70	1,57	1570
1990	0,37	962	322	0,029	3,11	1,42	1358
Изменения, %	32,1	-4,3	14,6	10,4	-15,8	-9,7	-13,5
Нижний морфологический участок							
1936	0,33	726	291	0,026	2,62	1,311	936
1990	0,32	847	360	0,026	2,48	1,294	1061
Изменения, %	-1,4	16,7	23,8	-2,1	-5,2	-1,3	13,3

Полный расход воды в основном русле и протоках составлял 1939 м³/с и 2015 м³/с соответственно в 1936 и 1990 гг. Осреднение выполнено для параметров потока в основном одноруканном русле.

По всей длине исследуемого участка р. Ангары ширина русла увеличилась на 15–24 %, что возможно при разработке береговых карьеров. На верхнем и нижнем участках увеличились расходы воды. На верхнем участке это явилось следствием уменьшения расходов пойменных проток и, в конечном итоге, их пересыханием. На нижнем участке увеличение расходов воды произошло из-за обмеления протоки Голуторовская.

Только на среднем участке повысилась гидравлическая шероховатость русла после сооружения полузапруд вдоль укрепленного дамбой левого берега Ангары.

На нижнем участке произошло увеличение ширины и площади поперечного сечения потока в береговых карьерах, которые разрабатывались на побочнях.

Наибольшие изменения потока произошли на 3-м и 4-м расчетных участках верхнего морфологического участка (табл. 4). Численные значения всех характеристик, кроме гидравлической шероховатости, увеличились. Средние скорости и расходы воды увеличились в 2–2,5 раза, шероховатость уменьшилась почти в 2 раза.

Таблица 4

Изменения параметров потока на Суховском перекате верхнего участка

Расчётные участки	Расположение	Годы	Уклон, м/км	Площадь, м ²	Ширина, м	Гидравлическая шероховатость	Средняя глубина, м	Ср. скорость, м/с	Расход, м ³ /с
3-й	Между истоками проток Иданская и Волковская	1936	0,30	591	225	0,042	2,63	0,79	466
		1990	0,38	793	273	0,025	3,00	1,45	1141
	Изменение,%		26,7	34,2	21,1	-40	14,3	84,4	145
4-й	Перекат Суховской	1936	0,22	603	240	0,042	2,51	0,61	394
		1990	0,38	703	260	0,029	2,70	1,31	919
	Изменение,%		72,7	16,7	8,3	-31	7,6	114	133

На среднем морфологическом участке отдельно рассмотрены 6-й – 9-й расчётные участки, по длине которых укреплен левый берег реки и на дне построены полузапруды (табл. 5). Здесь уменьшилась средняя глубина потока и скорость течения. Расход по сравнению с 1936 г. не изменился. За период после 1981 г. уклон водной поверхности на участке увеличился в 1,7 раза при увеличении гидравлической шероховатости в 1,2 раза.

Таблица 5

Изменение параметров потока на среднем участке при укреплении берега

7-й – 9-й расчётные участки	Годы	Уклон, м/км	Площадь, м ²	Ширина, м	Гидравлическая шероховатость	Ср. глубина, м	Ср. скорость, м/с	Расход, м ³ /с
Между островами Красавец и Лиственничный	1936	0,27	982	248	0,027	4,03	1,62	1559
	1990	0,46	1017	290	0,033	3,53	1,51	1530
Изменение, %		70,1	3,6	16,9	22,6	-12,3	-6,8	-1,9

В 1936 г. на верхнем и среднем участках было 7 пойменных протоков (табл. 6). К 1990 г. осталось только пять из них. Пропускная способность Иданской протоки сохранилась, Лиственничной и Волковской – увеличилась. Расход Монастырской протоки уменьшился в 6 раз, Еловой – в 3 раза.

Таблица 6

Пропускная способность пойменных протоков

Протоки	Q, м ³ /с		Изменение, %
	1936 г.	1990 г.	
Монастырская	213	35,5	-83,4
Еловая	659	208	-68,4
Иданская	588	578	-1,8
Волковская	98	221	127
Верхняя Лебяжья	257	0	-100
Нижняя Лебяжья	135	0	-100
Лиственничная	145	203	39,9

По длине Ангары имеется три русловых разветвления: Волковское, Лиственнично-Берёзовское, Усть-Балейское. Изменение пропускной способности Волковской протоки рассмотрено в табл. 6, а данные по Лиственнично – Берёзовскому и Усть-Балейскому разветвлениям приведены в табл. 7.

Таблица 7

Пропускная способность разветвлений русла

Морфологические образования	Q, м ³ /с		%
	1936 г.	1990 г.	
<i>Разветвление у о. Лиственничный</i>			
Левый рукав у о. В. Берёзовый	300	507	68,8
Левый рукав у о. Н. Берёзовый	400	448	12,0
Правый рукав у о. В. Берёзовый	1291	896	-30,6
Правый рукав у о. Н. Берёзовый	1191	917	-23,0
Протока между островами	100	-21	-121
<i>Никольское разветвление</i>			
Протока Голуторовская	1005	955	-5,0
р. Ангара	934	1060	13,6
<i>Усть-Балейское разветвление</i>			
Правый рукав у о. Долгий	509	531	4,4
Левый рукав у о. Долгий	425	529	24,6

В Лиственничной протоке, входящей в Лиственнично-Берёзовское разветвление, расход потока в 1990 г. увеличился в 1,4 раза.

В протоке Берёзовой (левый рукав разветвления) расход увеличился в 1,7 раза по сравнению с природным состоянием. Береговая линия протоки имеет криволинейное очертание. При высоких уровнях в ней развиваются циркуляционные течения, которые увеличивают её пропускную способность. Изгиб потока усиливает отложение наносов вдоль правого берега протоки, где образуется обширный пляж с глубинами менее 1 м.

В Лиственнично-Берёзовском разветвлении уменьшение расхода произошло в правом рукаве на перекате Грязнуха. Несмотря на ежегодные дноуглубительные работы, расход на перекате Грязнуха уменьшился в 1,3 раза.

В Усть-Балейском разветвлении левый рукав был разработан при переносе в него судового хода. Увеличение расхода в рукаве стало возможно после перекрытия поперечной протоки вдольбереговой дамбой.

За 45 лет после 1936 г. пропускная способность Голуторовской протоки уменьшилась на 5 %, а расход основного русла Ангары увеличился на столько же.

Заключение

Исследуемый участок р. Ангары длиной 24 км находится под влиянием семи факторов техногенного воздействия, которые начали проявляться в 1960-е гг. после начала работы Иркутского гидроузла. Многочисленные карьеры в русле и отдельных пойменных протоках не только увеличили поперечное сечение потока, но и изменили крупность донных отложений. Из карьеров удалялись донные отложения крупного галечника, разрушалась отмостка, которая защищала русло в природном состоянии.

Сброс высоких расходов воды в начале 70-х гг., превышающих 3500 м³/с, вызвал размывы русла и просадку уровня 2 м, которая через несколько лет распространилась и на средний участок.

По всей длине рассматриваемого участка действовали русловые и пойменные карьеры, проводились дноуглубительные работы особенно интенсивно в период катастрофически низкой водности конца 70-х гг.

Гидротехнические работы в русле привели к отмиранию проток верхнего и среднего участков. Увеличилась концентрация стока в основном русле. Укрупнились пойменные острова обоих участков.

Сооружение Иданского карьера на пойме среднего участка с перекрытием двух крупных пойменных проток привело к углублению русла Суховского переката и протоки Волковская, стимулировало размыв левого берега Ангары на среднем участке.

Укрепление размываемого берега полузапрудами усилило размыв дна на среднем участке и вынос наносов на перекат Грязнуха.

Наибольшие просадки уровня сформировались на нижнем участке, где кроме разработки русла в карьерах добавился размыв дна ниже области образования и прорыва зажоров.

Снижение уровней в конце среднего участка, спрямление русла Голуторовской протоки и строительство двух продольных дамб в месте спрямления привело к обмелению и уменьшению пропускной способности протоки.

Заносится правый рукав Усть-Балейского разветвления, из русла которого много лет эпизодически добывался гравий. Занесение рукава усилилось после строительства продольной дамбы между левым и правым рукавами.

Работа выполнена при поддержке гранта ФЦП 2009-1.1-154-069-005 «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области географии и гидрологии суши».

Список литературы

1. Гидрологический ежегодник 1945.– Л. : Гидрометеиздат, 1951. – Т. 7, вып. 0–8. – 184 с.
2. Карта реки Ангара от Иркутской ГЭС до 142 км. – Иркутск : Гос. предприятие «Водные пути Вост.-Сиб. бассейна», 1994. – 70 с.
3. Мазур Г. С. Просадка уровней в нижнем бьефе Иркутской ГЭС / Г. С. Мазур // Тр. Вост.-Сиб. отд-ния АПВН. – Вып. 2. – Новосибирск : Наука, 2005. – С. 118–129.
4. Мазур Г. С. Состояние русла и поймы в районе г. Ангарска за последние 70 лет / Г. С. Мазур // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер.: Науки о Земле. – 2009. – Т. 2, № 2. – С. 134–148.
5. Навигационная карта реки Ангары от истока до Братска. – Иркутск : Вост.-Сиб. бассейн. упр. речных путей, 1939. – 96 с.
6. Спицин И. П. Общая и речная гидравлика / И. П. Спицин, В. А. Соколова. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 359 с.
7. Справочник по гидравлическим расчётам / под ред. П. Г. Киселёва. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1972. – 239 с.

Changing the characteristics of Angara river in the tailrace of the Irkutsk hydroelectric station as a result of anthropogenic impact

Galina S. Mazur

Abstract. Completed the investigation of parameters of non-uniform motion in the central part of the tailrace of the Irkutsk hydroelectric station based on topographic maps and river channel surveys Angara river for a length of 24 km. Determined a change in depth, width, current velocity, water surface slope, hydraulic roughness, depending on the influence of hydraulic structures, thermal pollution flow, mining and dredging. The reviewed plot is different with many arms and a high level of anthropogenic impact.

Keywords: channel process, technogenic impact, branching flow, thermal pollution, flood channels, the mainstream.

*Мазур Галина Степановна
доцент кафедры гидрологии и охраны
водных ресурсов
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52-10-72*