

З. Д. Копалиани,
канд. техн. наук, доц., РГГМУ;

А. Б. Клавен,
д-р техн. наук, доц., РГГМУ;

В. М. Католиков,
канд. техн. наук, доц., РГГМУ;

В. Н. Коковин,
РГГМУ

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ РЕЧНЫХ РУСЕЛ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОТИВОПАВОДКОВЫХ РАСЧИСТОК РЕК БАСЕЙНА КУБАНИ

DIVERSION CAPACITY OF RIVER BEDS AND EFFICIENCY OF ANTIFLOOD CLEARANCE OF RIVERS IN KUBAN BASIN

В статье приводятся результаты лабораторных исследований, выполненных с целью разработки рекомендаций по повышению пропускной способности речных русел с разными типами руслового процесса.

The article considers results of laboratory investigations, carried out to develop recommendations for increasing diversion capacity of river beds with different types of river bed evolution.

Ключевые слова: русловой процесс, гидравлические характеристики потока, профиль дна, транспорт наносов, русловые мезоформы

Key words: river bed evolution, flood hydraulic characteristics, bottom grade, sediment transportation, channel mesoforms

В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЙ практике, часто с целью увеличения пропускной способности русла и понижения уровней воды и соответственно уменьшения площадей затопления прибрежных территорий во время половодий и паводков, прибегают к таким искусственным методам реконструкции речных русел, как углубление и расширение русла, спрямление излучин, расчистка русел от русловых форм типа побочней, осередков, пляжей, перекатов и т. д. Подобные мероприятия при их высокой стоимости чаще всего не имеют достаточного научного обоснования, редко подкреплены необходимыми расчетами, натурными данными или экспериментами и носят в основном интуитивный характер.

Под пропускной способностью речных русел и каналов в гидравлике и гидрологии понимается расход воды, протекающий при заданных гидравлических характеристиках

потока: поперечном сечении русла или канала и продольном уклоне свободной водной поверхности.

Пропускную способность русла часто характеризуют величиной K , называемой модулем расхода или расходной характеристикой

$$K = \frac{Q}{\sqrt{i}},$$

где Q — расход воды;

i — продольный уклон водной поверхности.

При использовании уравнения Шези, величина K может быть выражена через величины, характеризующие размер, форму и шероховатость русла

$$K = \omega \cdot C \sqrt{H} = \frac{1}{n} \omega \cdot H^{\frac{2}{3}},$$

где ω — средняя площадь поперечного сечения потока;

C — коэффициент Шези;

H — средняя по сечению глубина потока;

n — коэффициент шероховатости, по Маннингу.

Коэффициент шероховатости обычно назначается на основе качественного, интегрального описания условий обтекания потоком граничной поверхности. При этом рассматривается случай обтекания потоком жестких, недеформируемых границ русла с неподвижной зернистой шероховатостью дна. Значение n принимается постоянным во всем диапазоне наполнения русла водой.

При оценке гидравлических сопротивлений — потеря энергии при движении воды в естественных руслах с деформируемыми границами и транспорте донных наносов, теория руслового процесса вынуждена подходить с иных позиций, учитывающих принцип саморегулирования и самоорганизации транспорта наносов и морфологического строения речного русла в ходе руслового процесса.

Согласно фундаментальному положению М. А. Великанова (Великанов, 1958) в русловом потоке при его взаимодействии с руслом следует различать два режима взаимодействия: руслоформирующие (паводочные) условия, когда поток формирует русло динамического равновесия — «поток управляет руслом», и условия обтекания потоком «реликтового» русла и его морфологического строения, оставленного предшествующим, «руслоформирующим расходом воды» — «русло управляет потоком». Это положение свидетельствует о существовании двух, различных законов сопротивления русла потоку: в режиме формирования русла динамического равновесия и в режиме обтекания потоком русла, сформированного предшествующим расходом воды. При этом отмеченное никак не учитывается традиционной гидравликой.

Гидравлические сопротивления, выражая меру потерь энергии в русловом потоке, очевидно, выполняют роль внутренних механизмов саморегулирования в системе причинно-следственных связей, именуемой русловым процессом. Поэтому развитие физичес-

ких представлений о гидравлических сопротивлениях при движении жидкости в руслах рек требует углубленного изучения механизма руслоформирования и режима транспорта донных наносов, оценки раздельного, группового и суммарного вклада в гидравлические сопротивления плесов и перекатов, русловых макроформ (речных излучин), мезоформ (побочней, осередков), микроформ — гряд, механизма турбулентности и фаз водного режима (половодье, межень) и др.

Ниже приведены результаты лабораторных исследований, выполненных в ГГИ с целью изучения пропускной способности русел меандрирующих рек и побочневого типа и определения вклада в гидравлические сопротивления плесов, перекатов, побочней и микроформ речного русла (З. Д. Копалиани, М. М. Гендельман, 1989).

На схематической модели меандрирующего русла с 14 хорошо развитыми излучинами, с гладким песчаным дном ($d = 0,33$ мм) были последовательно выполнены опыты при нескольких расходах воды, при которых фиксировался профиль свободной водной поверхности. При наибольшем (руслоформирующем) расходе воды, когда в движение пришли наносы, слагающие дно потока, профиль водной поверхности фиксировался дважды: в начале опыта, когда только началось движение песка, но дно оставалось плоским, и через 36 часов, когда в русле полностью сформировались перекаты и плесы.

В последующих опытах малые (неруслоформирующие) расходы воды были повторно пропущены в русле, но уже с «реликтовыми» перекатами и плесами, сформировавшимися при предшествующем руслоформирующем расходе воды.

На рис. 1, где нанесены профили дна и водной поверхности в ходе описанных опытов, видно, что водная поверхность при руслоформирующем расходе воды при наличии и отсутствии плесов и перекатов остается неизменной. Отсюда следует, что при этом расходе воды плесы и перекаты не вносят никакого дополнительного вклада в гидравлические сопротивления (кривая 2). Отмеченное является экспериментальным подтверждением великановского принципа «минимума дисси-

пации энергии» в русловом потоке. Сравнение положения кривых 3 и 4 свидетельствует о том, что перекаты, сформированные руслоформирующим расходом воды, уже являются

вая 3 — наименьшая пропускная способность к руслу с микроформами (кривая 2), далее от побочной без микроформ на их поверхности (кривая 4) к гладкому, безгрядовому руслу

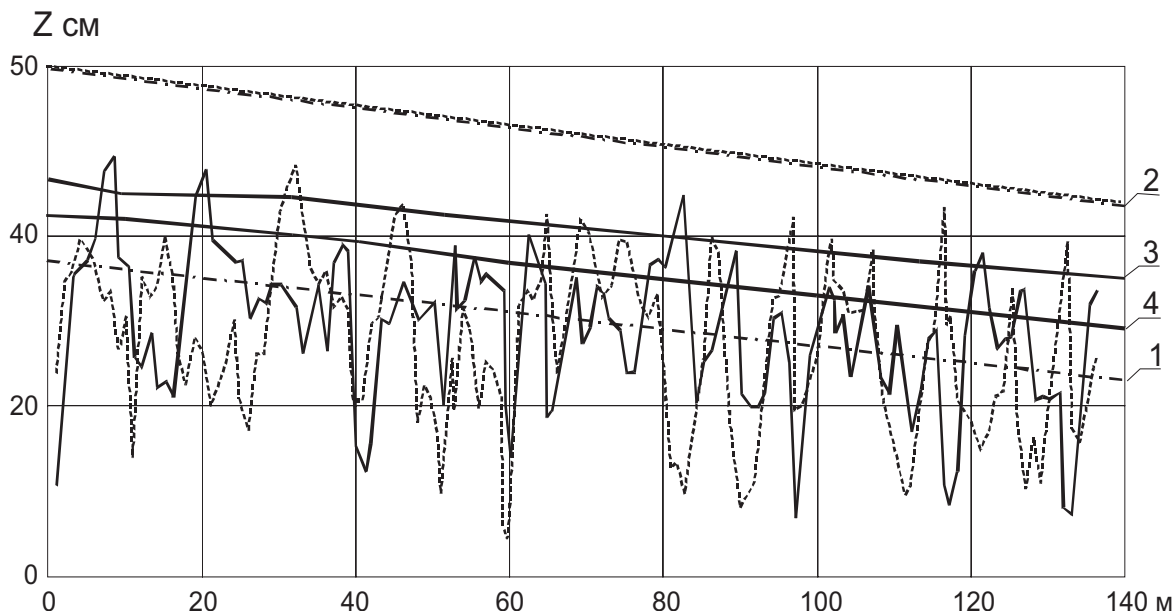


Рис. 1. Продольные профили дна и водной поверхности на схематической модели меандрирующей реки.

Условные обозначения: 1 — исходный профиль плоского дна; 2 — профиль водной поверхности при наличии и отсутствии плесов и перекатов при руслоформирующем расходе воды; 3 — профиль водной поверхности при наличии плесов и перекатов ($Q = 6,6$ л/с); 4 — профиль водной поверхности при отсутствии плесов и перекатов ($Q = 6,6$ л/с)

источником дополнительного сопротивления для расходов, меньших руслоформирующих расходов воды.

На рис. 2 представлены результаты экспериментов, выполненных в бетонном лотке длиной 82 м, шириной 2 м, по оценке пропускной способности русла побочного типа при различных состояниях дна (гладком, безгрядовом; только с микроформами на дне; с побочными с микроформами и без микроформ).

Из рис. 2 следует, что пропускная способность русла в зависимости от форм и режима транспорта наносов на дне меняется в широких пределах. Она увеличивается в следующей последовательности: от побочной с микроформами на их поверхности (кри-

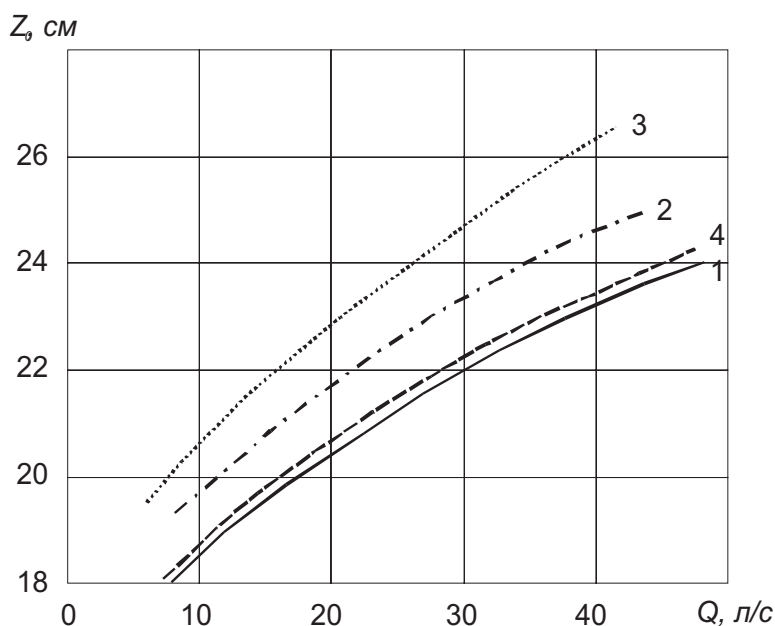


Рис. 2. Кривая $Z_0 = f(Q)$ по данным экспериментов на 82-метровом лотке при различных состояниях дна:

1 — гладкое (безгрядовое дно), 2 — микроформы, 3 — побочни с микроформами, 4 — побочни без микроформ

(кривая 1 — наибольшая пропускная способность).

Сравнивая кривые 3 и 4, соответствующие двум состояниям русла с побочным типом с микроформами на их поверхности и искусственно стертými микроформами, видно, сколь значительно увеличивается пропускная способность русла и уменьшаются гидравлические сопротивления, если предположить, что произошло стирание гряд в результате взвешивания частиц в мелкопесчаном русле в природных условиях или в случаях, когда гряды на поверхности побочной, сложенных из крупных частиц наносов, не образуются.

Отсюда следует, что, регулируя формы (мезо-, микроформы) и виды транспорта наносов (взвешивание, сальтация, донное влечение), река через гидравлические сопротивления изменяет в широких пределах не только транспортирующую, но и пропускную способность русла.

Описанные эксперименты с речными излучинами и побочным типом руслового процесса указывают на сложный характер формирования гидравлических сопротивлений в руслах с различным типом руслового процесса и присущим каждому типу морфологическим строением русла. Величина сопротивления меняется в зависимости от конкретного вклада в потерю энергии в русловом потоке конкретных речных и русловых форм (излучин, плесов, перекатов, побочной, осередков, гряд) в различные фазы водного режима (половодье, межень).

При искусственном вмешательстве в морфологическое строение речных русел или их частей (перекрытие рукавов многорукавных русел, спрямление отдельных излучин или их групп, изъятие из русла русловых мезоформ: перекатов, побочной, осередков, углубление и расширение русел и т. д.), режим гидравлических сопротивлений испытывает существенные, трудно предсказуемые изменения в силу большого разнообразия этих мероприятий и форм вмешательства.

Большинство рек бассейна Кубани относится к горно-предгорной зоне, и их русла сложены из крупного аллювия (гравий, галька, валуны). Выполнение природных исследований на таких реках во время паводков

крайне затруднительно в силу сравнительно редкой повторяемости высоких половодий и паводков, их скоротечности, исчисляемой часами, часто в ночное время, и больших значений скоростей потока (4–7 м/с), при которых вести непосредственные измерения на реке практически невозможно.

С другой стороны, в отличие от равнинных рек, сложенных из песка, русла рек горно-предгорной зоны хорошо воспроизводятся в лабораторных условиях на неискаженных гидравлических моделях с размываемым дном, поскольку крупность донных наносов на модели или в гидравлическом лотке может быть уменьшена в линейном масштабе модели с соблюдением не только геометрического, но и динамического (числа Фруда) и кинематического подобия, в зоне автомодельности по числу Рейнольдса (З. Д. Копалиани и др., 1986).

Ниже приведены результаты лабораторных исследований, выполненных с целью оценки эффективности влияния расчисток мезоформ речного русла на пропускную способность при побочном и осередковом типах руслового процесса во время паводков и половодий.

Побочный тип руслового процесса характеризуется наличием в русле крупных, занимающих в меженный период большую часть ширины русла, частично обсыхающих в меженный период отмелей, расположенных в русле в шахматном порядке. В период паводков побочни покрываются водой, и русло приобретает прямолинейный вид. Обсохшие побочни в межень придают руслу в плане извилистость. Пониженные, затопленные части в местах перегиба русла между побочнями образуют перекаты. Плесы в русле располагаются против выпуклых краев побочной. Русловые деформации при побочном типе руслового процесса сводятся к сползанию побочной вниз по течению в периоды половодий и паводков. Длина побочной составляет 4–8 ширин русла, а их высота 0,3–0,6 глубины в плесе в бровках русла.

Побочный тип как самостоятельный тип руслового процесса встречается, в основном, на прямолинейных или слабоизвилистых участках рек, а также в отдельных рукавах русел при пойменной многорукавности и свободном меандрировании.

Эксперименты в составе настоящих исследований выполнялись в гидравлическом, стеклянном лотке длиной 8 м, шириной 0,2 м с высотой боковых стенок 0,25 м. Дно лотка также стеклянное.

В экспериментах использовался песок в диапазоне крупности частиц 0,5–2 мм со

средневзвешенным диаметром 0,98 мм. Состав экспериментальной смеси наносов состоял из трех основных компонентов: 0,5–0,7 мм (10%); 0,7–1 мм (65%) и 1–2 мм (25%).

Гидравлические условия выполнения экспериментов и соответствующие им натурные условия представлены в табл. 1.

Таблица 1

Гидравлические условия выполнения опытов в 8-метровом экспериментальном лотке

	Масштабные коэффициенты		Численные значения гидравлических характеристик	
	символ	значение	лаборатория	натура
Линейные характеристики потока				
Глубина	α_H	100,0	1,0 см	1,0 м
Ширина	α_B	100,0	20,0 см	20,0 м
Длина	α_L	100,0	8,0 м	800,0 м
Гидравлические характеристики потока				
Уклон дна	α_I	1,0	0,008	0,008
Крупность руслового материала Диапазон изменения Средневзвешенный диаметр	α_d	100	0,5–2,0 мм 0,98 мм	5,0–20,0 см 9,8 см
Расход воды	$\alpha_Q = \alpha_H^{5/2}$	100 000	0,75 л/с	75 м ³ /с
Скорость потока	$\alpha_V = \sqrt{\alpha_H}$	10,0	37 см/с	3,7 м/с
Относительная ширина русла B/H	$\alpha_{B/H}$	1,0	20,0	20,0
Число Фруда $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$	α_{Fr}	1,0	0,79–0,92	0,79–0,92
Коэффициент Шези	α_C	1,0	41,1 м ^{1/2} /с	41,1 м ^{1/2} /с
Масштаб времени морфологических и гидравлических процессов	$\alpha_t = \sqrt{\alpha_H}$	10,0	1 час	10 часов
Расход донных наносов	$\alpha_{Q_T} = \alpha_H^{5/2}$	100 000	0,73 см ³ /с	0,073 м ³ /с
Относительная гладкость потока H/d	$\alpha_{H/d}$	1,0	20,0	20,0

В табл. 2 представлены морфометрические и динамические характеристики по-

бочней, полученных в этих экспериментах (рис. 3).

Таблица 2

Морфометрические и динамические характеристики лабораторных и природных побочней

	Длина		Высота		Скорость перемещения, С поб		Относительная скорость перемещения
	лаборатория	натура	лаборатория	натура	лаборатория	натура	
Средняя	120 см	120,0 м	0,82 см	0,82 м	0,85 мм/с	30,6 м/ч	0,0019
Максим.	150,0 см	150,0 м	1,2 см	1,20 м	1,1 мм/с	39,6 м/ч	0,0023
Миним.	90,0 см	90 м	0,45 см	0,45 м	0,6 мм/с	21,6 м/ч	0,001 46

Концентрация донных наносов в опытах составляла 0,000 97.

Важно отметить, что в описанных экспериментах транспорт донных наносов осуществлялся без образования микроформ-гряд поверх тела побочней. Это объясняется малыми значениями относительной гладкости потока в описанных опытах, составляющих $H/d = 20$ (табл. 1).

Далее в экспериментальных исследованиях в 8-метровом лотке была выполнена расчистка двух побочней. Протяженность образовавшегося карьера составила 2,4 м (240 м природы), а глубина изъятия грунта 2,5 см (2,5 м природы).

На рис. 4 представлены продольные профили дна и свободной водной поверхности потока при наличии и изъятии побочней в начальной стадии занесения карьера донными наносами. Скорость занесения карьера в опытах была неравномерной. Наибольшая скорость занесения проявилась в самой начальной стадии опыта. Это происходило за счет размыва верхового откоса карьера. С размывом верхового откоса

карьера связано и локальное увеличение уклона водной поверхности потока, что вызывало и некоторое уменьшение глубины потока. Но это локальное и кратковременное уменьше-

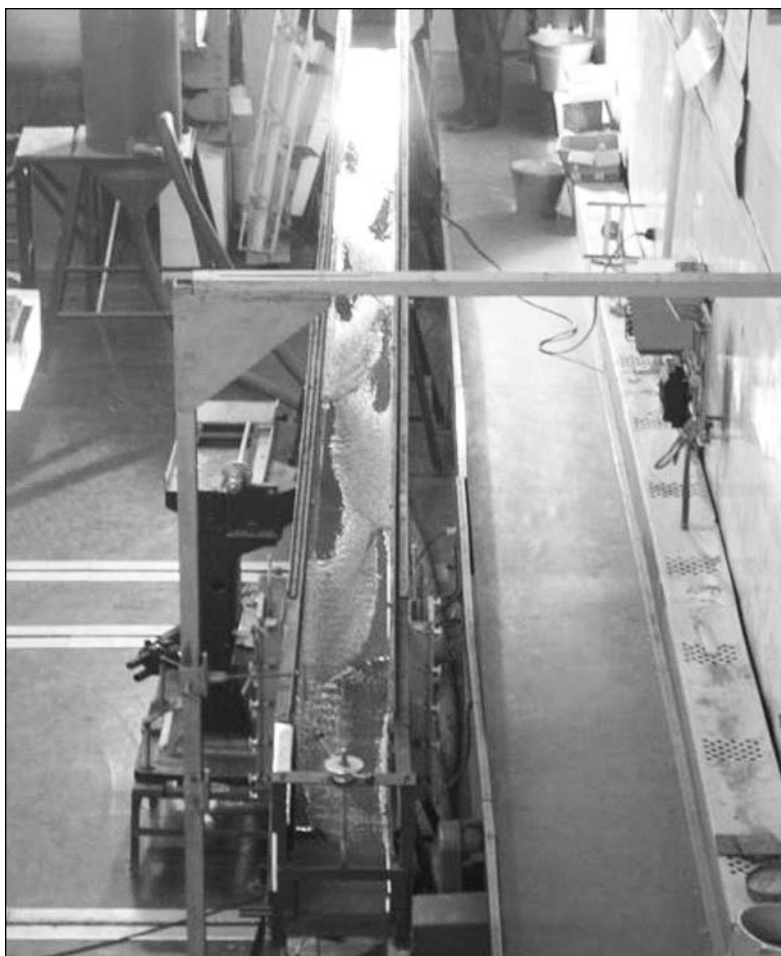


Рис. 3. Побочни, сформировавшиеся в 8-метровом лотке в эксперименте 1 (вид против течения)

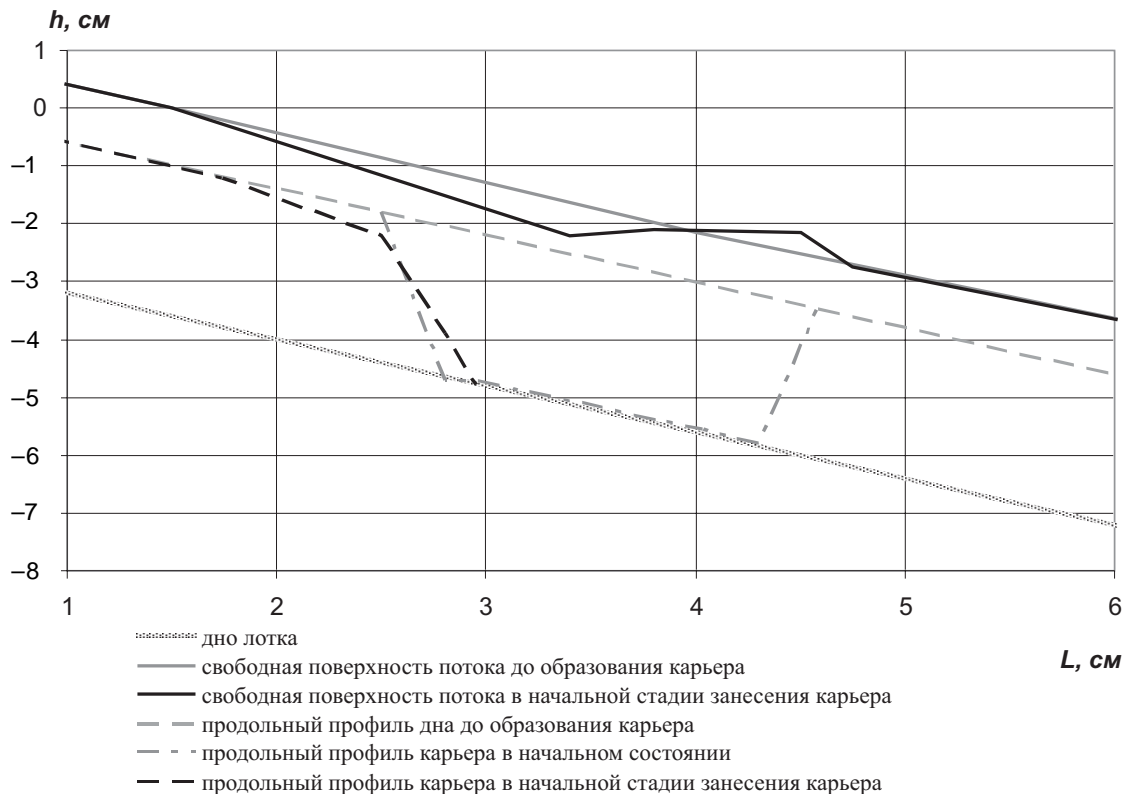


Рис. 4. Продольные профили дна и свободной поверхности потока при наличии побочной в лотке и при изъятии двух из них (образование карьера) в начальной стадии его занесения

ние глубины не вызывало общего понижения уровня воды в пределах карьера и, тем более, совершенно не отразилось на участках потока выше и ниже карьера. Таким образом, выемка аллювия из русла реки в объеме двух смежных побочной не сказывается на пропускной способности русла, не вызывает понижения уровней воды и не решает проблемы защиты прирусловой (пойменной или иной) территории от затопления паводочными водами.

Время занесения карьера и восстановления побочного рельефа в описанном опыте составило соответственно 73 и 193 минуты (12,1 и 32,2 часа в натуре).

Наряду с побочным типом руслового процесса, на реках бассейна р. Кубань широко распространен осередковый тип (русловая многорукавность). Этот тип руслового процесса характеризуется распластанным руслом, по которому в паводочный период перемещаются мезоформы: осередки, побочни и ленточные гряды, частично обсыхающие в период межени и создающие многорукавный облик русла.

На реках бассейна Кубани русловая многорукавность (осередковый тип) распространен в верховьях Кубани, на Малом и Большом Зеленчуках, Лабе, Большой и Малой Лабе в нижнем течении р. Кубань выше впадения р. Лаба.

На рис. 5 представлен типичный участок р. Лаба с русловой многорукавностью, который служил прототипом для воспроиз-



Рис. 5. Участок р. Лаба с русловой многорукавностью

ведения и изучения в лабораторных условиях осередкового типа руслового процесса в русловой лаборатории ГГИ.

Целью лабораторных исследований, выполненных в бетонном гидравлическом лотке длиной 50 м (ширина 2 м), было следующее:

- воспроизведение в лабораторных условиях осередкового типа руслового процесса;
- выполнение опытов по оценке эффективности расчисток русла с целью понижения уровней воды во время паводков и половодий;
- разработка рекомендаций по организации искусственных карьеров-ловушек донных наносов для изучения режима стока наносов в составе программы мониторинга водных объектов на реках бассейна Кубани.

Экспериментальный лоток оборудован мерным баком, обеспечивающим подачу требуемого расхода воды, измеряемого с помощью водослива Томпсона, волногасительными габионами на входе в лоток для создания равномерного распределения скоростей пото-

ка по ширине лотка и гашения волн, песколовкой и водосливным щитом переливного типа в конце лотка. Подача наносов в ходе каждой серии экспериментов осуществлялась вручную в объемах, соответствовавших среднему выносу наносов в песколовку.

Опыты выполнялись с песчано-гравийной смесью в диапазоне крупности фракций 0,1–5 мм, со средневзвешенным значением диаметра 0,67 мм (6,7 см натуры).

В соответствии с критериальной зависимостью для условий формирования побочной и осередков, полученной В. М. Католиковым (В. М. Католиков, З. Д. Копалиани, 2001 г.), осередки в равномерном установившемся потоке формируются при условии

$$Fr < 2,8 \left(\frac{BJ}{H} \right)^{0,6}$$

Гидравлические характеристики, при которых выполнены эксперименты, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Гидравлические условия выполнения опытов в 50-метровом экспериментальном лотке

	Масштабные коэффициенты		Численные значения характеристик	
	символ	значение	лаборатория	натура
Линейные характеристики потока				
Глубина	α_H	100,0	4,0 см	4,0 м
Ширина	α_B	100,0	200,0 см	200,0 м
Длина	α_L	100,0	5000,0 см	5000,0 м
Гидравлические характеристики потока				
Уклон дна	α_I	1,0	0,0045	0,0045
Крупность руслового материала: Диапазон изменения Средневзвешенный диаметр	α_d	100	0,1–4,0 мм 0,67 мм	1,0–40,0 см 6,7 см
Расход воды	$\alpha_Q = \alpha_H^{5/2}$	100 000	40,0 л/с	4000 м ³ /с
Скорость потока	$\alpha_V = \sqrt{\alpha_H}$	10,0	50,0 см/с	5,0 м/с
Относительная ширина русла B/H	$\alpha_{B/H}$	1,0	50,0	50,0
Число Фруда $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$	α_{Fr}	1,0	0,8	0,8

Таблица 3
(продолжение)

Критериальный параметр B/H	$\alpha_{B/H}$	1,0	0,22	0,22
Коэффициент Шези	α_C	1,0	37,3 м ^{1/2} /с	37,3 м ^{1/2} /с
Масштаб времени гидравлических и морфологических процессов	$\alpha_t = \sqrt{\alpha_H}$	10,0	1 час	10 часов
Расход донных наносов	$\alpha_{Q_T} = \alpha_H^{5/2}$	100 000	46,1 см ³ /с	4,6 м ³ /с
Относительная гладкость потока H/d	$\alpha_{H/d}$	1,0	59,7	59,7

Из табл. 3 следует, что при заданных гидравлических характеристиках отмеченное критериальное условие выполняется ($0,8 < 1,13$).

В ходе экспериментов измерялись продольный профиль свободной водной поверхности, скорости поверхностных течений, расход донных наносов, морфометрические

и динамические характеристики русловых мезо- и микроформ, а также гранулометрический состав наносов, выносимых потоком в песколовку.

В экспериментах исследовался процесс формирования и динамики русловых мезоформ в виде осередков, побочной и ленточных гряд и их трансформация в ходе опытов (рис. 6), включая: причленение мезоформ-середков к стенкам лотка в виде побочной и отчленение побочной от стенок лотка и их превращение в осередки. Очень часто в руслах рек горно-предгорной зоны при осередковом типе руслового процесса также наблюдается одновременное присутствие в потоке и осередков и побочной (рис. 5).

Основной транспорт наносов в лотке, включая поверхность мезоформ, осуществлялся в форме микроформ — дюн длиной в среднем 22 см (5,5 глубины потока) и высотой до 2 см (0,5 глубины потока).

В описанных экспериментах относительно устойчивый транспорт наносов в форме осередков, т. е. русловая многорукавность, в лабораторных условиях была воспроизведена впервые.

Морфометрические и динамические характеристики мезоформ в опытах, выполненных в 50-метровом гидравлическом лотке, представлены в табл. 4.

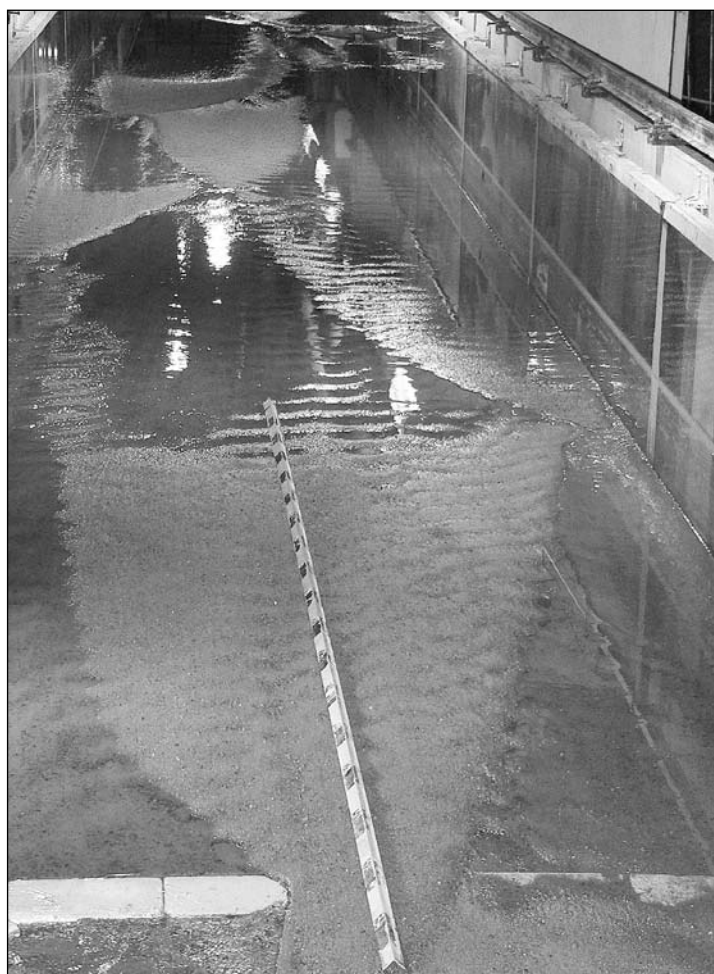


Рис. 6. Мезоформы (осередки), сформировавшиеся в ходе проведения экспериментов

Морфометрические и динамические характеристики экспериментальных мезоформ

	Побочки			Осередки		
	Высота (см)	Длина (м)	Скорость перемещения (м/мин)	Высота (см)	Длина (м)	Скорость (м/мин)
Средняя	4,1	7,15	0,09	2,5	6,57	0,08
Максимальная	5,0	7,85	0,10	3,2	7,40	0,085
Минимальная	3,2	6,40	0,08	2,0	5,0	0,07

В следующих двух сериях экспериментов в 50-метровом гидравлическом лотке воспроизводились искусственная расчистка мезоформы (осередка) с целью выяснения влияния (эффективности) этой расчистки на пропускную способность русла и искусственный карьер-ловушка донных наносов для оценки стока донных наносов и изучения характеристик транспорта наносов для их учета при организации мониторинга водных объектов на участках рек бассейна Кубани с осередковым типом руслового процесса.

Мезоформа-осередок длиной 5 м (500 м в натуре) с характеристиками, указанными в табл. 4, была срезана на участке 25–30 м от начала лотка. На рис. 7 представлены продольные профили дна и водной поверхности при формировании осередков и после срезки мезоформы.

Как следует из этого рисунка, изменения в положении продольного профиля воды в пределах и выше карьера имеют локальное распространение, не превышающее 3 мм (30 см в натуре), и не могут повлиять на общую пропускную способность русла.

Таким образом, при борьбе с наводнениями и паводками расчистка мезоформы с целью снижения отметок уровня воды на участке срезки мезоформы неэффективна.

Время восстановления мезоформы на месте срезанной в результате наползания новой мезоформы с верхнего участка составило 1 час в опытах, что соответствует 10 часам природы продолжительности активного транс-

порта донных наносов во время паводка на исследуемом участке р. Лаба (табл. 3).

В следующей серии экспериментов в лотке на 25-м метре от его начала на всю ширину был устроен глубокий карьер (ловушка) длиной 1,3 м (по верху) и 1,0 м (по дну) глубиной 3–5 глубины потока.

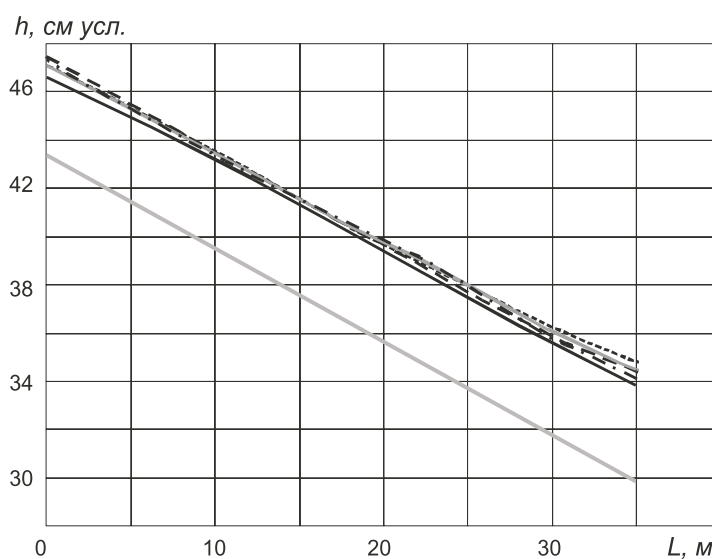


Рис. 7. Продольные профили свободной поверхности воды при формировании осередков и срезке мезоформ

Сопоставление продольных профилей свободной поверхности воды в ходе экспериментов, представленное на рис. 8, свидетельствует о том, что влияние подобного карьера на положение продольных профилей воды проявляется только в пределах самого карьера и ниже него.

Время занесения карьера составило 1,8 ч (18 часов природы), что позволяет уменьшить его глубину при воспроизведении в натуральных условиях до двух раз, достаточной для занесения одним паводком.

h , см усл.

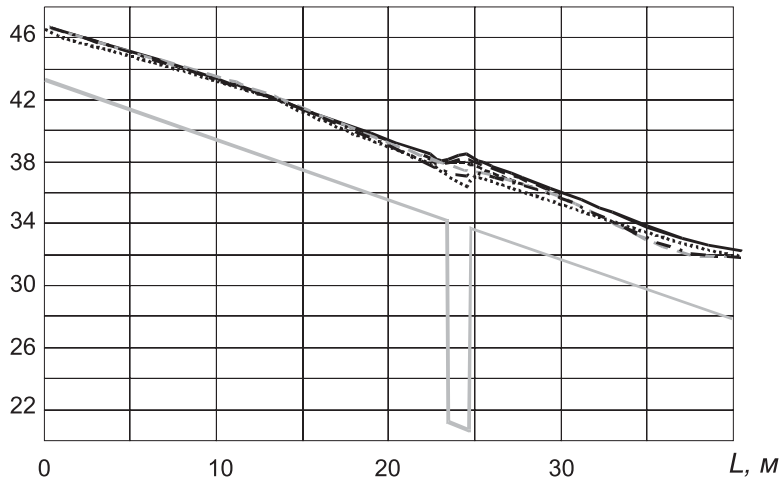


Рис. 8. Продольные профили дна и свободной поверхности воды в ходе занесения глубокого карьера-ловушки

Часто задачу увеличения пропускной способности речных русел с целью понижения уровней воды в реке для безопасного пропуска половодий и паводков проектировщики пытаются решать в комплексе с добычей аллювиального материала из русел и пойм рек для строительных целей или улучшения условий судоходства на перекатных участках рек.

В качестве двух примеров приведем результаты исследований ГГИ, выполненных на реке Лабе с целью рационализации добычи руслового материала из этой реки Мостовским дробильно-сортировочным заводом и оценки противопаводкового эффекта этого мероприятия, и прокомментируем результаты многолетних полевых исследований ОАО «Кубаньводпроект», выполненных на участке Нижней Кубани между Краснодарским и Тиховским гидроузлами протяженностью около 130 км за период 1978–2007 гг.

Работы ГГИ на р. Лаба выполнялись в 1992–1996 гг. и включали широкий комплекс натуральных и лабораторных исследований гидравлического и руслового режимов этой реки на участке карьерных разработок у пос. Мостовского (А. Б. Швидченко, З. Д. Копалиани, 1997).

В результате натуральных и лабораторных исследований на неискаженной размываемой гидравлической модели и гидравлическом 100-метровом лотке были подробно изучены режим стока донных наносов, русловые деформации, гидравлический режим и технологические вопросы изъятия аллювия из русла р. Лаба.

На рис. 9 представлены фактические данные о профилях дна и водной поверхности на исследуемом участке реки до и после организации карьерной выемки.

По данным полевых и лабораторных исследований было установлено, что разработка в течение 2,5 лет в русле р. Лаба у пос. Мостовского карьера длиной 1900 м, шириной 80–300 м и глубиной 4 м (глубина потока выше карьера 1–1,5 м) приводит к снижению уровней

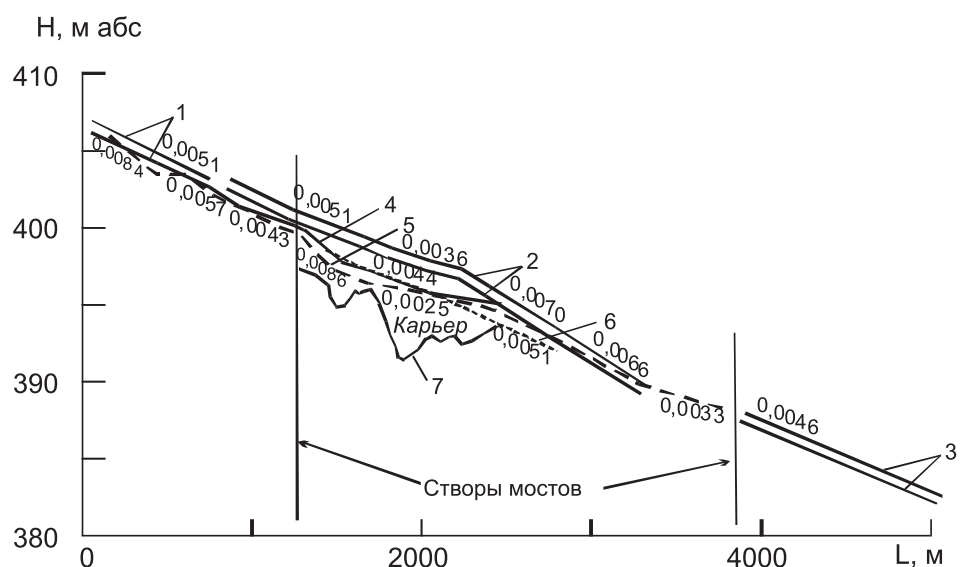


Рис. 9. Продольные профили водной поверхности (1–6) и дна (7) р. Лабы у пос. Мостовского: до создания карьера (1984) 1 — $Q = 164 \text{ м}^3/\text{с}$, 2 — $Q = 189 \text{ м}^3/\text{с}$, 3 — $Q = 173 \text{ м}^3/\text{с}$; после создания карьера (1992) 4 — $Q = 256 \text{ м}^3/\text{с}$, 5 — $Q = 192 \text{ м}^3/\text{с}$, 6 — $Q = 246 \text{ м}^3/\text{с}$; 7 — 18.06.92

воды на участке реки в пределах карьера на 2–2,5 м. Выше карьера, на расстоянии 1 км, понижение уровней воды в реке составляет 1–1,5 м, а ниже карьера на таком же расстоянии — на 0,5–1 м.

Таким образом, разработка длинного руслового карьера вызывает значительное снижение отметок дна и водной поверхности на участке протяженностью 4–5 км в районе карьера, что благоприятно скажется на условиях пропуска половодий и паводков на этом участке и уменьшении площадей затоплений. Однако, как было показано этими исследованиями, отмеченный карьер полностью перехватит объем стока наносов на 10–15 лет, что неблагоприятно повлияет на состояние окружающей среды и экологические условия в районе карьера и ниже него.

В связи с понижением уровня грунтовых вод на прилегающих территориях и изменением режима русловых деформаций и стока наносов ниже карьера, карьер может негативно повлиять на водоснабжение, продуктивность сельскохозяйственных угодий, нерестилища рыб и устойчивость инженерных сооружений.

В рамках отмеченных исследований были установлены критериальные условия сопряжения руслового карьера с транзитным потоком, обозначающие границу функционирования карьера в затопленном и незатопленном режимах. При затопленном сопряжении карьера с потоком изменения водного режима имеют локальный характер и проявляются только на участке карьера, тогда как при незатопленном режиме водная поверхность претерпевает существенную трансформацию и за пределами карьера, выше и ниже него, как это имело место в описанном примере на р. Лаба.

Критерием для разделения карьеров, (глубиной более глубины потока) на указанные две группы, служит соотношение $\Delta Z \ll H$, где $\Delta Z = I \cdot LK$ — максимально возможное снижение уровня воды в створе верхового откоса карьера (I и H соответственно уклон водной поверхности выше карьера и глубина потока в естественных (ненарушенных) условиях, LK — длина карьера). При $\Delta Z < H$ карьер будет функционировать в затопленном режиме, а при $\Delta Z > H$ — в незатопленном. Записав граничное критериальное условие в виде $I \cdot LK = H$, имеем для затопленного режима $LK < H/I$ и для незатопленного режима $LK > H/I$.

Наибольшая длина карьера, функционирующего в затопленном режиме на исследуемом участке р. Лабы при $I = 0,0048$ и $H = 1–2$ м составляет 208–416 м. Следовательно, как и было показано, карьер на р. Лабе длиной 1900 м функционирует в незатопленном режиме, когда у верхового откоса карьера (в отличие от затопленного карьера) образуется кривая спада, способствующая интенсивному размыву дна и понижению отметок водной поверхности выше карьера. При этом течение в транзитной зоне карьера имеет те же или близкие гидравлические характеристики, что и выше карьера.

На рис. 10 представлены продольные профили дна и водной поверхности на участке

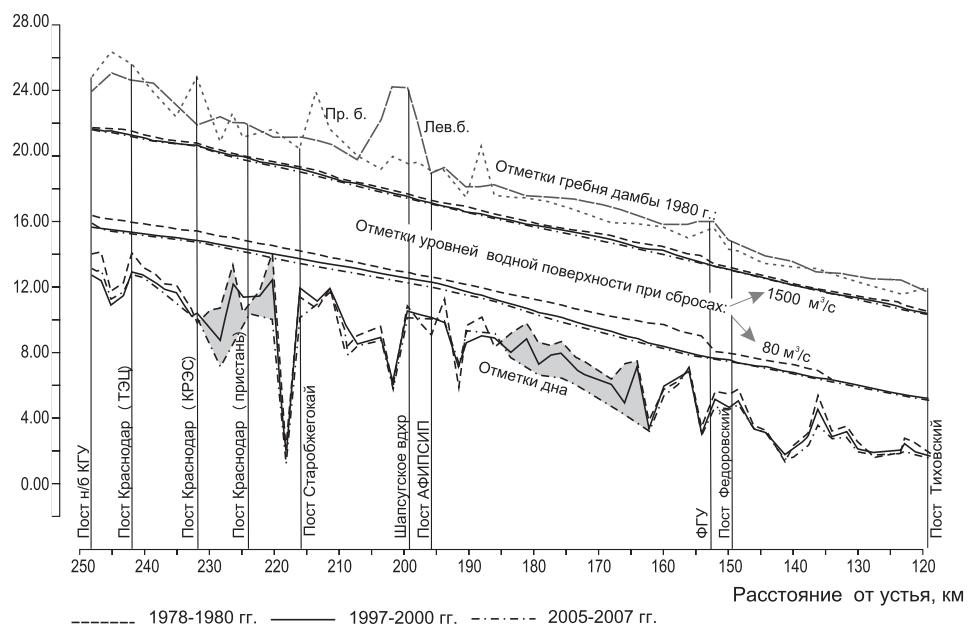


Рис. 10. Продольные профили дна и свободной поверхности воды Нижней Кубани

русла Нижней Кубани между Краснодарским и Тиховским гидроузлами, по данным ОАО «Кубаньводпроект». Из рис. 10 следует, что за период с 1978 по 2007 г. продольный профиль дна по тальвегу испытал существенные изменения в результате добычи из русла р. Кубань строительного материала и путевых работ на перекатах. На участке русла 164–187 км от устья по судовому ходу длиной 23 км отметки дна понизились на 3,5 м, а на участке 218–231 км от устья длиной 13 км — на 5,0 м.

Как следует из рис. 10, водная поверхность при руслоформирующем расходе воды ($Q = 1500 \text{ м}^3/\text{с}$) практически не «чувствует» изъятия больших объемов грунта из русла р. Кубани как в целом, так и на двух протяженных участках этой реки, показанных на рисунке темным цветом. Влияние изъятий грунта (понижение отметок дна) сказывается на понижении отметок водной поверхности лишь при малых (меженных) расходах воды в реке $80 \text{ м}^3/\text{с}$.

В заключение коротко остановимся на проблеме спрямления речных излучин. Этот метод также используется для увеличения пропускной способности русел меандрирующих рек с целью понижения уровня воды и борьбы с наводнениями и паводками. Однако этот метод еще чаще и с большим успехом используется еще в двух целях: для уменьшения длины судоходного пути на меандрирующих реках и стабилизации (замедления) темпов размыва вогнутого берега речных излучин.

Вопрос об эффективности спрямления излучин меандрирующих рек для увеличения пропускной способности русел с целью борьбы с наводнениями и паводками в имеющейся литературе освещается весьма противоречиво и не получил однозначного реше-

ния. (Pan Chig shen et. al., 1978); (Morisawa, 1985), М. М. Гендельман, И. В. Попов, 1987).

В частности, по свидетельству М. Морисавы (Morisawa, 1985) паводок 1975 г. на р. Миссисипи после спрямления до этого 16 излучин на этой реке на некоторых участках дал отметку максимального уровня воды повторяемостью 1 раз в 200 лет, тогда как обеспеченность этого паводка была 1 раз в 30 лет. Морисава объясняет это непредсказуемыми деформациями русла и изменением режима транспорта наносов и вследствие этого резким увеличением гидравлических сопротивлений, вызвавшим уменьшение пропускной способности русла на участках спрямлений.

Подводя краткий итог изложенному выше, необходимо еще раз отметить, что проблема пропускной способности речных русел с разными типами руслового процесса является фундаментальной проблемой современной гидравлики, зависящей, прежде всего, от уровня разработки вопроса о гидравлических сопротивлениях в потоках с подвижными границами. Решение этой проблемы требует разработки количественных методов учета вклада речных и русловых макро-, мезо- и микроформ в гидравлические сопротивления и пропускную способность речных русел, а также характеристик стока наносов, гидрологического режима, типа руслового процесса и величины реки.

Поскольку отмеченная проблема в общем виде в науке еще не решена, для принятия конкретных практических решений о целесообразности расчисток русла и обосновании противопаводковой эффективности этих мероприятий необходим индивидуальный подход к каждому водному объекту и решаемой на этом объекте задаче.

Список литературы

1. Великанов М. А. Русловой процесс. — М.: Госфизматиздат, 1958. — 395 с.
2. Копалиани З. Д., Гендельман М. М. Русловой процесс и гидравлические сопротивления // Проблемы современной гидрологии. — Л.: Гидрометеоздат, 1989. — С. 288–304.
3. Копалиани З. Д., Твалавадзе О. А., Носелидзе Д. В. Методика и результаты исследований русловых деформаций на неискаженной модели р. Хара-Мурин // Тр. ГГИ. — Л.: Гидрометеоздат, 1986. — Вып. 301. — С. 68–79.
4. Католиков В. М., Копалиани З. Д. Побочни в руслах рек: условия образования и их динамика // Водные ресурсы. — 2001. — Т. 28, № 5. — С. 579–586.

5. Швидченко А. Б., Копалиани З. Д. Влияние выемок аллювия на гидравлический и русловой режимы горной реки // Водные ресурсы. — 1997. — Т. 24, № 6. — С. 672–678.

6. Гендельман М. М., Попов И. В. О развитии спрямлений речных русел // Тр. ГГИ. — Л.: Гидрометеоздат, 1987. — Вып. 307. — С. 3–16.

7. Pan Chig-shen, Shin Shao-chuan and Tuan Wen Chung. A Study of the channel development after the completion of artificial cutoffs in the middle Yangtze river. — J. Sci Sinica, 1978. — Vol. XXI, № 6. — P. 783–804.

8. Morisawa M. Rivers. Form and process. — Longman Group Limited, 1985. — 222 p.