УДК 551.435.13.627.81

Р.С. Чалов[1], Чжао Еань[2], Т.И. Волкова[3], Лю Щугуан[4], С.Р. Чалов[5], А.С. Завадский[6]

ВЛИЯНИЕ ГИДРОУЗЛОВ НА РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕК ХУАНХЭ И ЯНЦЗЫ

Рассмотрены специфические особенности переформирований русел крупнейших рек Китая ниже введенных в эксплуатацию в конце XX – начале XXI в. гидроузлов (Три ущелья и Гэччжоуба на Янцзы, Саньмынься и Сяоланди на Хуанхэ). Они определяются отличающимся от российских рек режимом водохранилищ (сработкой в паводочный период летом и наполнением в зимнюю межень), огромным стоком наносов и неполным перехватом водохранилищами влекомых наносов, существованием противопаводковых дамб практически на всем протяжении участков рек ниже гидроузлов (вплоть до устьев рек), а также выполнением других крупномасштабных регуляционных мероприятий, связанных с предотвращением наводнений. Показаны отличия скорости распространения вниз по течению, темпа и форм проявления врезания (глубинной эрозии), в том числе отсутствие волны аккумуляции наносов перед фронтом размыва русла, размыв берегов и как следствие расширение русла, последнее особенно проявлено на р. Хуанхэ. Этому способствует сужение по длине реки (к устью) пояса руслоформирования противопаводковыми дамбами и спрямление излучин (на Янцзы). Отмечены положительные последствия врезания, которое сменило направленную аккумуляцию наносов до создания водохранилищ, что сказалось в снижении угрозы прорыва дамб и затопления освоенных территорий.

Ключевые слова: русловые процессы, нижний бьеф, водохранилище, сток наносов, врезание, размывы берегов.

Введение. Создание водохранилищ на реках вносит существенные изменения в русловые процессы ниже по течению вследствие регулирования стока воды (а иногда и его уменьшение из-за потерь стока на испарение, водозабора в ирригационые системы или межбассейновых перераспределений) и перехвата стока наносов. Поэтому русла рек ниже водохранилищ представляют собой объекты многочисленных исследований как фундаментального, так и прикладного характера [Маккавеев, 1957; Лапшенков, 1979; Векслер, Доненберг, 1983; Babiński, 2002; Беркович, 2012]. На их основе разработаны методы расчета и прогноза деформаций русел в нижних бьефах гидроузлов и их учета при использовании водных ресурсов, воднотранспортной эксплуатации рек и т.д. Обзор и обобщение сведений о русловых процессах на реках в разных частях света выполнен З. Бабиньским [2002], который детально изучил их на р. Висла ниже водохранилища Влоцлавек [Babiński, 1997]. Региональные оценки, выполненные для рек Азии, Африки и Америки [Kondolf, 1997; Graf, 2006], позволили получить концептуальные схемы развития эрозии и врезания рек в условиях дефицита наносов (hungry water) [Schmidt, Wilcock, 2008]. Большое внимание исследованиям русловых процессов на реках ниже водохранилищ уделяется в Китае, где это связано в первую очередь с предотвращением наводнений в дождливые летне-осенние периоды вследствие систематической направленной аккумуляции в нижнем течении рек.

Сведения о специфике русловых процессов в условиях направленной аккумуляции наносов на реках Китая хорошо освещены в основном в англоязычной (китайские авторы) и российской литературе. Результаты исследований трансформации русел рек после создания каскада водохранилищ на великих китайских реках для российских специалистов из-за языкового барьера практически неизвестны; имеются лишь краткие резюмирующие данные, опубликованные в статьях российских и китайских ученых в межвузовских сборниках трудов по эрозионным и русловым процессам [Завадский и др., 2010; Лю Шугуан и др., 2011] и упоминаемые в монографии К.М. Берковича [2012].

Цель исследований – проанализировать русловые процессы и изменения характеристик русел после ввода в эксплуатацию в конце 1990-х – начале 2000-х гг. гидроузлов Три Ущелья на р. Янцзы, Саньмынься и Сяоланди на р. Хуанхэ (рис. 1). При этом учитываются гидролого-географические особенности регулирования стока китайских рек, которые связаны как с водным режимом (летне-осенний па-

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail*: rschalov@mail.ru

[2] Научно-исследовательский институт водного хозяйства р. Хуанхэ, Китай, г. Чжэнчжоу; профессор; *e-mail*: zys081@126.com

[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, аспирантка; *e-mail*: volkova_tatiana@inbox.ru

[4] Тонкийский университет, Китай, г. Шанхай, профессор, докт. н.; *e-mail*: liusgliu@tongji.edu.cn

[5] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, ст. науч.с., канд. геогр. н.; *e-mail*: hydroserg@mail.ru

[6] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, вед. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: az200611@rambler.ru

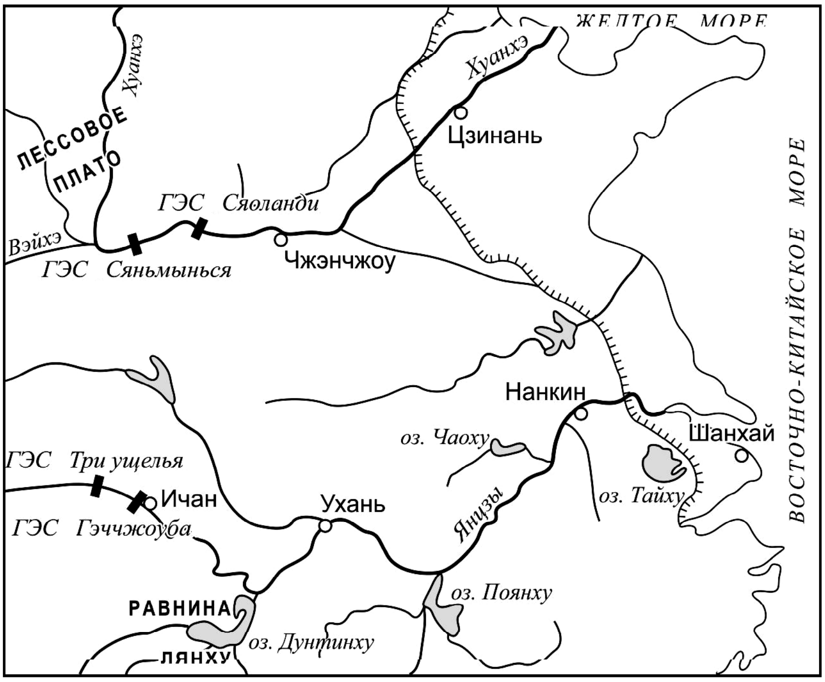

Рис. 1. Схема расположения гидроузлов в нижнем течении рек Хуанхэ и Янцзы

водочный период), так и с уникальным по объему стоком наносов, определяющим одну из основных задач создания водохранилищ – борьбу с наносами. Интенсивная направленная аккумуляция наносов (до 8 см/год) приводит к тому, что русла рек Хуанхэ и Янцзы оказались «подвешенными» над прилегающей территорией, например, уровень воды в межень превышает ее на Хуанхэ на 8–13 м [Serries of picture…, 1991; Чалов и др., 2000; Li Guoying, 2003]. В этих условиях при естественном состоянии реки постоянно существует угроза катастрофических наводнений из-за перелива воды через противопаводковые дамбы. Строительство их для предотвращения наводнений началось еще в III в. до н. э. во времена династии Западная Хань. В XX в. стали возводить паводкораспределительные гидроузлы и создавать паводкоаккумулирующие районы.

Из-за повышающихся уровней воды вследствие систематического отложения в русле наносов требуется постоянно наращивать высоту дамб, реконструировать и укреплять их для предотвращения перелива воды через них и их разрушения, а также из-за воздействия потока при блуждании русла.

Материалы и методы исследований. В основу статьи положены результаты детальных исследований, выполненных китайскими специалистами из НИИ водного хозяйства Хуанхэ (г. Чжэнчжоу) и Янцзы (г. Ухань), а также результаты рекогносцировочных обследований и руслового анализа, проведенного совместно с российскими учеными. Определение скорости направленных русловых деформаций осуществлялось по изменению значений уровня воды, смещению кривых расхода воды на гидрологических постах, сопоставлению поперечных профилей русла на разных участках рек и расчету баланса наносов по длине рек.

Результаты исследований и их обсуждение. ***Регулирование стока воды и наносов*** – главная причина трансформации русла ниже водохранилищ. На Янцзы перекрытие реки в створе будущей ГЭС Три ущелья (Санься) состоялось в декабре 1997 г.; с 2003 г. ГЭС находится в режиме эксплуатации; в 2010 г. гидроузел вышел на полную мощность. Общий объем водохранилища 39,7 км^3, мертвый объем 17,5 км^3. Ниже ГЭС (г.п. Ичан, 1990 км от устья) средний годовой объем стока воды составляет 438 км^3 при среднегодовом расходе 14 320 м^3/с), сток взвешенных наносов в естественных условиях достигал 578 млн т/год (среднегодовая мутность 1,29 кг/м^3), сток влекомых наносов – 13,08 млн т/год [Чалов и др., 2000]. Бо́льшая часть стока наносов (82–95%) формируется в многоводный период с мая по октябрь, причем 60% приходится на июль–сентябрь.

В 40 км ниже ГЭС Три ущелья находится ГЭС Гэччжоуба, функционирующая с 1981 г. (объем водохранилища 1,6 км^3).

За счет регулирования стока максимальный расход воды Янцзы с 1%-ной обеспеченностью снижен до 56 700 м^3/с, с 0,1%-ной обеспеченностью – до 71 700 м^3/с (при 110 000 м^3/с до создания водохранилищ). В период с 1981 по 1989 г. объем отложений наносов в водохранилище Гэччжоуба составил 140 млн т. В результате этого и последовавшей с 1998 г. аккумуляции в водохранилище Три ущелья количество наносов, поступающих в нижние бьефы обоих гидроузлов, в 2003–2006 гг. сократилось на 59%, сток взвешенных наносов уменьшился до 337 млн т/год, сток влекомых наносов – до 5,8 млн т в среднем течении непосредственно ниже ГЭС Гэччжоуба и с 34,3 до 13,9 млн т/год в нижнем течении (г.п. Датун). Таким образом, водохранилища Три ущелья и Гэччжоуба перехватывают более половины (56%) стока влекомых наносов и 41% стока взвешенных наносов (таблица). Это отличает Янцзы от других равнинных рек мира, водохранилища которых полностью аккумулируют поступающие в них влекомые наносы и пропускают в нижние бьефы в среднем такое же количество взвешенных наносов (в % от стока рек в бытовом состоянии), хотя в абсолютном выражении оно несравнимо больше. Очевидно, это связано с особенностями режима водохранилищ – их сработкой в летний паводочный период. Пропуск многоводных паводков сопровождается восстановлением стокового течения по всей длине водохранилища, что в свою очередь приводит к частичному выносу отложившихся наносов, в том числе влекомых, отличающихся малой крупностью ($d_{ср}$=0,15÷0,20 мм), в нижний бьеф [Sou Lisheng, 2004; Xiangyang, 2004].

В среднем течении р. Хуанхэ построен каскад гидроузлов, в нижнем течении (ниже слияния с р. Вэйхэ) – гидроузлы Саньмынься (1960) и Сяоланди (1999); последний – перед выходом реки на Великую Китайскую равнину. Хуанхэ – крупнейшая в мире река по годовому стоку наносов (1300 тыс. т), который обусловлен очень интенсивной эрозией в пределах пересекаемого рекой Лёссового плато. Среднегодовой объем стока воды составляет 59 км^3, суммарный объем обоих водохранилищ – 52,7 км^3, полезный объем – 34,6 км^3. На р. Хуанхэ, в отличие от водохранилищ на р. Янцзы, сработка водохранилищ летом более глубокая – чаша водохранилища Саньмынься практически полностью опорожняется в многоводный паводочный период и заполняется в зимнюю межень, вследствие чего зимой на Хуанхэ в нижнем течении значения расхода воды ниже гидроузлов снижаются в отдельные годы до нулевой отметки. Пропуск паводковых вод при этом регулируется таким образом, что расход воды в бровках противопаводковых дамб сокращается с 7000 до 2600 м^3/с и растягивается во времени. На водохранилище Сяоланди для увеличения пропускной способности русла и снижения заиления водохранилища создается искусственный паводок. В результате происходит промывка водохранилища, вынос значительной части накопившихся в нем наносов, в том числе влекомых ($d_{ср}$=0,05÷0,06 мм), в нижний бьеф, а затем их транзит во время летнего паводочного периода вниз по течению. В 2002–2003 гг. вследствие таких паводков пропускная способность русла возросла на 200–300 м^3/с [Sou Lisheng, 2004].

Создание водохранилищ на Хуанхэ, несмотря на своеобразный режим сработки/наполнения, привело к существенному снижению стока наносов в нижнем течении реки (ниже гидроузла Сяоланди). До регулирования стока он достигал 1800 млн т/год, в 80–90-е гг. XX в. под влиянием гидроузла Саньмынься составил уже 800 млн т/год и к 2012 г., когда сказалось функционирование водохранилища Сяоланди, сократился до 300 млн т, т.е. произошло уменьшение стока наносов в 6 раз. При этом годовой сток влекомых наносов, доля которого в естественных условиях составляла всего 0,32% от общего [Чалов и др. 2000], сократился с 4,8 млн т (г.п. Хуаюанькоу, ближайший к гидроузлу Сяоланди) до 2,32 млн т, в том числе в паводочный сезон – с 3,48 до 1,43 млн т и в межень – с 1,38 до 0,89 млн т, т.е. в 2,4 и 1,5 раза соответственно.

Однако китайские специалисты из НИИ водного хозяйства Хуанхэ (г. Чжэнчжоу) считают, что снижение стока наносов на этой реке – не только следствие создания водохранилищ, хотя это главный фактор. Большое значение придается также крупномасштабным противоэрозионным мероприятиям на территории Лёссового плато – основного их по-

Общий размыв русла р. Янцзы ниже гидроузлов Три ущелья и Гэччжоуба

Участки ниже плотины	Расстояние от плотины Гэччжоуба	Длина участка, км	Расчетные данные			Объем размыва русла в 2002–2007 гг. по данным наблюдений, км^3
			общий объем размыва русла, км^3	среднее понижение отметок дна русла, м	срок размыва, годы	
Ичан–Сунчикао	0–75,7	75,7	0,073	1,00	10	0,089
Сунчикао–Тайпинкао	75,7–136,6	60,9	0,143	0,96	10	0,117
Тайпинкао–Оуцикао	136,6–223	86,4	0,384	3,42	30	–
Оуцикао–Чэнлинки	223–393,4	170,4	1,255	5,27	40	0,211
Итого: Ичан–Чэнлинки	0–393,4	393,4	1,855	–	40	0,466
Чэнлинки–Ухань	393,4–623,4	230	1,090	2,50	50	0,094
Итого: Ичан–Ухань	0–623,4	623,4	2,945	–	50	0,511
Ухань–Цзюцзян	623,4–874,4	251	0,296	0,59	70	0,129
Цзюцзян–Датун (г. Нанкин)	874,4–1123,4	249	0,179	0,36	80	–
Итого: Ичан–Датун (г. Нанкин)	0–1123,4	1123,4	3,420	–	80	–

ставщика в реку. В частности, расчеты стока взвешенных наносов, выполненные Лю Шугуаном [1998], дали общую его величину за весь период наблюдений (1946–1989), равную 1500 млн т, что на 17% меньше приведенной выше и относящейся к периоду до 1980 г. (Иногда 30% называют как показатель снижения поступления продуктов смыва почв благодаря массовому террасированию склонов.)

Русловые деформации в нижнем течении Хуанхэ и Янцзы во многом связаны со снижением стока наносов (W) и, соответственно, с изменением его соотношения с транспортирующей способностью потока ($W_{тр}$), в естественных условиях в нижнем течении обеих рек $W \gg W_{тр}$, в настоящее время $W < W_{тр}$. Вследствие этого процессы направленной аккумуляции наносов и систематического повышения отметок дна сменились процессами врезания русел и понижением отметок дна русла, что привело к снижению риска наводнений и размыва противопадковых дамб из-за перелива воды через них во время летне-осенних паводков. Этому способствовало снижение внутригодовой неравномерности стока, что помимо снижения уровней воды обеспечило равномерное распределение стока воды в течение года (кроме времени наполнения водохранилища Саньмынься в зимнюю межень).

На Янцзы по расчетным данным протяженность участка общего размыва достигнет 1123 км, и через 80 лет после ввода в эксплуатацию гидроузла объем размыва русла составит 3,42 км^3. Величина врезания и скорость распространения эрозии по длине реки зависят от геологического строения дна и берегов реки. На участке от г.п. Ичан до выхода реки из горной области на равнину Лянху (г. Сунчикао) при галечном составе аллювия величина эрозии сравнительно низкая, так как здесь формируется отмостка. На г.п. Ичан крупность донных отложений d_{50} увеличилась от 0,17 мм в 2001 г. до 12 мм в 2007 г., поэтому русло здесь быстро стабилизируется. Ниже по течению, где русло становится песчаным, врезание развивается интенсивно (до нескольких десятков сантиметров в год), распространяясь в течение десятилетий на большое расстояние (таблица).

По проектным расчетам величины размыва и понижения отметок дна русла должны увеличиваться вплоть до 393,4 км от гидроузла Гэччжоуба, где они достигнут максимальных значений 1,255 км^3 и 5,27 м соответственно. Далее вниз по течению они снижаются до г. Нанкин (г.п. Датун), где размыв русла прекращается. Это связано, во-первых, с последовательным насыщением потока продуктами размыва и, во-вторых, с распространением сюда приливных колебаний уровня моря.

По данным наблюдений за 2002–2007 гг., т.е. за 5 лет, общий размыв русла в нижнем бьефе распространился на расстояние 874,4 км и составил 0,640 км^3 грунта, вынесенного за пределы участка вниз по течению.

Учитывая планируемое строительство ряда крупных ГЭС выше гидроузла Три ущелья, задерживающего бо́льшую часть стока наносов, которые поступают в водохранилище, и уменьшение стока наносов за счет противоэрозионных мероприятий в бассейне, срок размыва русла в нижнем бьефе ГЭС Три ущелья будет очень продолжительным (до 80 лет) и объем размыва русла достигнет 3,5 км^3. При этом на верхнем участке Ичан–Сунчикао он уже несколько превысил проектный, хотя полученное расхождение находится в пределах точности расчетов и сопоставления натурных данных. Если принять за дату начала размыва время перекрытия Янцзы в створе плотины Три ущелья, то за 10 лет (до 2007 г.) трансгрессивное распространение эрозии происходило со скоростью свыше 90 км/год.

Характерно, что на Янцзы не проявляется волна аккумуляции наносов, выносимых из зоны размыва русла, столь типичная для российских и польских рек [Транспортное…, 1972; Дегтярев, 1992; Babiński, 1997; Беркович, 2012]. Очевидно, это связано с очень большим стоком наносов и предельно малой долей в нем влекомых наносов; происходящий частичный перехват наносов водохранилищем не компенсируется размывами в нижнем бьефе, вследствие чего волна аккумуляции наносов ниже зон размыва не наблюдается.

Еще более эффектны проявления процессов размыва русла р. Хуанхэ ниже водохранилищ Саньмынься и Сяоланди, особенно после ввода в эксплуатацию гидроузла Сяоланди, водохранилище которого полностью прервало сток влекомых наносов (при доле в естественных условиях от общего стока наносов 0,32% его абсолютная величина весьма внушительна – 4,86 млн т/год, что в 3,5 раза больше, чем на Оби у Новосибирска, и почти в 7 раз, чем на Северной Двине [Чалов и др., 2000], – реках такого же или даже несколько большего размера). Строительство этого гидроузла началось в 1991 г., и в 2004 г. он уже функционировал, хотя полностью строительные работы завершены в 2009 г. Ниже по течению произошло врезание русла, уровни снизились к 2012 г. на 1,7–2,2 м. Вследствие этого на большом расстоянии от плотины (800 км) прекращены работы по систематическому наращиванию противопаводковых дамб. Вниз по течению понижение уровней при равных расходах (а соответственно, и отметки дна) уменьшается. По сравнению с 1999 г. в 2009 г. оно составило на гидрологических постах Хуаюанькоу (район г. Чжэнчжоу) 1,74 м, Цзяхэтань – 1,85 м, Гоацунь – 1,34 м, Айшань – 0,96 м, Лэкоу – 1,34 м и Лицзинь (34 км от устья) – 1,23 м [Особенности…, 2011]. Активизация размывов в нижней половине нижнего течения реки, очевидно, связана со стеснением реки противопаводковыми дамбами, вытянутыми по левому и правому берегам, – в районе г.п. Хуаюанькоу пояс блуждания русла между ними составляет 4,5–10 км, в низовьях (около 300 км) – 0,6–1,8 км.

Размыв русла, понижение отметок дна и уровней практически при любом расходе воды (рис. 2) был зафиксирован на г.п. Хуаюанькоу, ближайшем к гидроузлу Сяоланди, уже в 1996–1999 гг., а в 2002–2003 гг. наблюдался в низовьях реки на г.п. Лицзинь

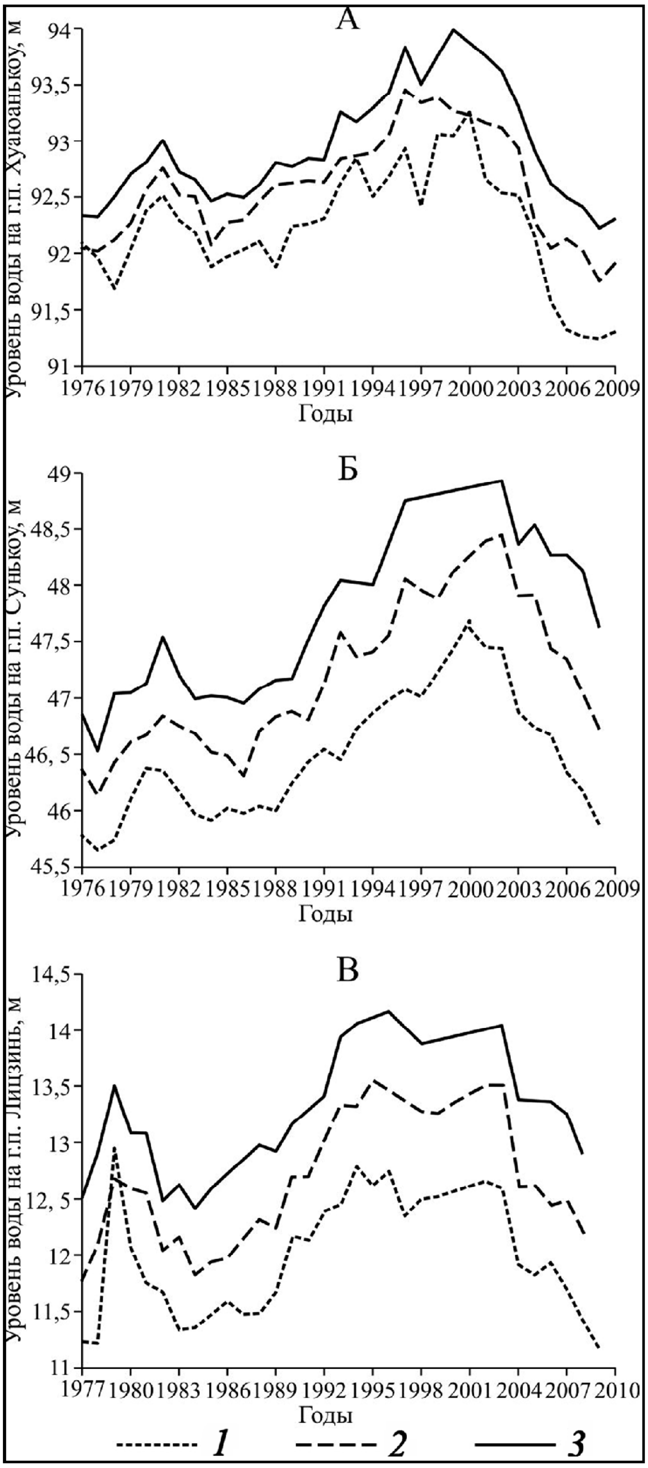

Рис. 2. Изменение уровня воды в нижнем бьефе гидроузла Сяоланди (А – г.п. Хуанькоу, Б – г.п. Сунькоу, В – г.п. Лицзинь) при расходе воды 1000 (1), 2000 (2), 3000 м^3/с (3), по [Особенности…, 2011]

[Особенности…, 2011]. Таким образом, скорость распространения глубинной эрозии на р. Хуанхэ составляет около 150 км/год, что больше, чем на Янцзы, и так же, как на последней, не сопровождается образованием волны аккумуляции наносов ниже фронта размыва.

На рис. 3 приведены графики изменения уровней воды при расходе 3000 м^3/с (близкий к среднегодовому) в нижнем течении Хуанхэ начиная с 1955 г., т.е. за 10 лет до строительства гидроузла Саньмынься. В 1960 г. с вводом его в эксплуатацию направленная аккумуляция наносов была прервана, и начался размыв русла, продолжавшийся вблизи плотины (г.п. Хуаюанькоу) всего 4 года (до 1963 г.). Уровни воды (и, соответственно, отметки дна) при этом понизились более чем на 1 м. Но затем ниже гидроузла вновь началась аккумуляция наносов, которая привела к повышению уровней на 2,5 м к 1999 г., когда стало сказываться влияние уже двух водохранилищ – Саньмынься и Сяоланди. Однако вниз по течению волна врезания продолжала распространяться вплоть до 1965–1967 гг., достигнув г.п. Лэкау в низовьях.

Прекращение размыва русла в середине 1960-х гг. связано с очень быстрым заилением водохранилища Саньмынься, которое практически перестало существовать уже к концу 1960-х–началу 1970-х гг. Режим наполнения/сработки водохранилища был установлен без учета его возможной заносимости – наполнения в паводочный летне-осенний период, когда на реке сток взвешенных наносов достигает почти 1300 млн т, влекомых – 1,43 млн т, и сработки водохранилища в зимне-весеннюю межень. Поэтому гидроузел был реконструирован (наполнение его стало проводиться в межень), что привело к некоторому понижению уровней в 1980-е гг. Лишь после создания водохранилища Сяоланди размыв русла в нижнем течении Хуанхэ приобрел направленный характер, хотя понижение уровней, как и отметок дна, еще не достигло уровня 1950 г.

Все нижнее течение р. Хуанхэ оказалось охваченным размывом с 2003 г., и к 2009 г. объем размыва и выноса наносов в устье составил 13,04 км^3 наносов.

Одновременно с размывом дна и понижением его отметок в нижнем течении Хуанхэ отчетливо прослеживается расширение русла из-за активизации размыва берегов (рис. 4), наиболее значительной между г.п. Хуаюанькоу и Цзехэтань. На приплотинном участке гидроузла Сяоланди (до г.п. Хуаюанькоу) оно меньше, очевидно, из-за наибольшего темпа врезания реки. (На российских реках размывы берегов и расширение русел обычно наблюдаются только на приплотинных участках, т.е. там, где дефицит наносов сказывается в наибольшей мере, а также в тех местах, где врезание ограничивается подстилающими русло трудноразмываемыми грунтами [Русловые процессы…, 2001]. В этих условиях поток реализует транспортирующую способность не только вследствие размыва дна, но и берегов.

Сокращение интенсивности врезания Хуанхэ вниз по течению сопровождается активизацией размыва берегов. Однако на нижнем участке из-за стеснения русла дамбами, предотвращающими размывы берегов, расширение русла незначительно или вообще не наблюдается.

Расширение русла Хуанхэ – следствие чрезвычайно легкой размываемости грунтов в пространстве между противопаводковыми дамбами на противоположных берегах, где происходит блуждание русла, вместе с тем это фактор увеличения его по-

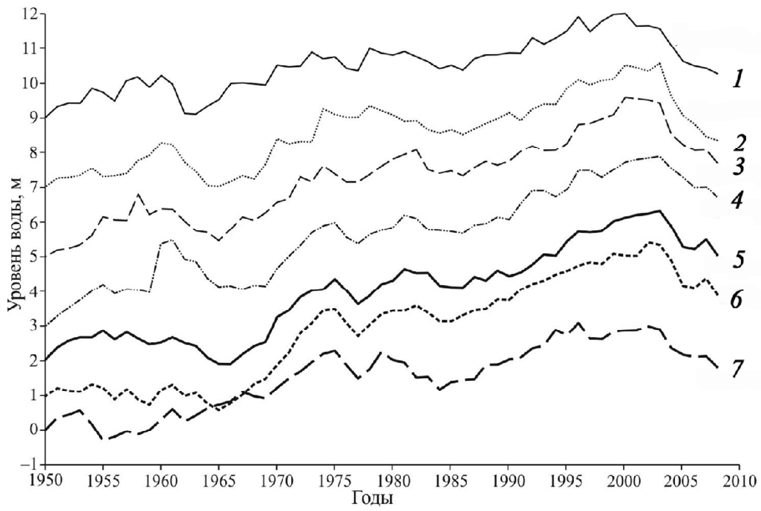

Рис. 3. Изменение уровня воды в нижнем течении р. Хуанхэ за 1950–2010 гг. на гидрологических постах: *1* – Хуаюанькоу, *2* – Цзяхетань, *3* – Гоацунь, *4* – Сунькоу, *5* – Айшань, *6* – Локоу, *7* – Лицзинь, по [Особенности…, 2011]

препятствует аккумуляции наносов и способствует их выносу в устье реки. В качестве косвенного отражения этих явлений можно рассматривать увеличение крупности донных отложений на Хуанхэ в 2 раза (при общей их очень небольшой крупности) на всем протяжении нижнего течения – в створе г.п. Хуаюанькоу (район г. Чжэнчжоу) с 0,082 до 0,2, г.п. Гаоцунь – с 0,06 до 0,135, г.п. Айшань – с 0,05 до 0,1, г.п. Лицзинь (34 км от устья) – с 0,046 до 0,1 мм.

На Янцзы подобные изменения ширины русла не отмечены, видимо, из-за того, что вдоль русла и его рукавов почти на всем протяжении реки сооружены капитальные противопаводковые дамбы. Но здесь также нельзя относить понижение уровня только на счет врезания русла в нижнем бьефе гидроузлов. Янцзы, выходя из горной области на равнину Лянху

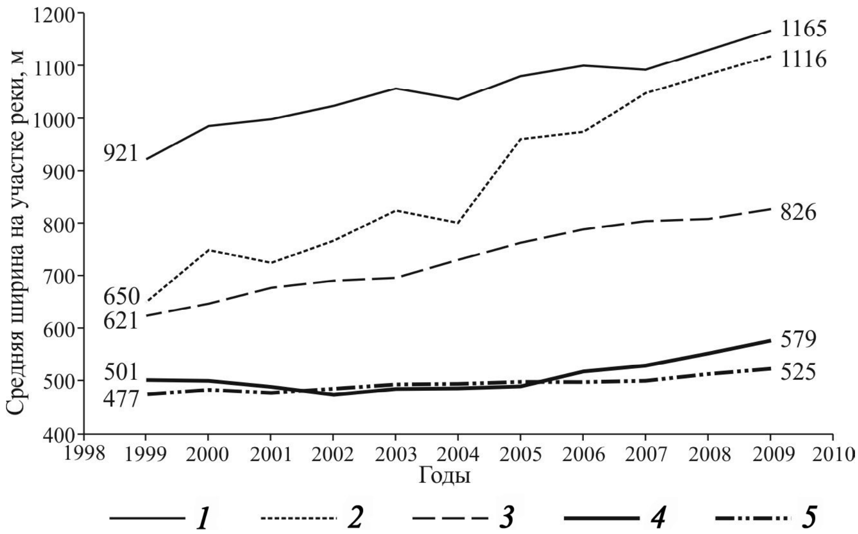

Рис. 4. Изменение ширины русла по длине р. Хуанхэ ниже гидроузла Сяоланди за 1999–2009 гг. на участках: *1* – гидроузел–Хуаюанькоу, *2* – Хауюанькоу–Цзяхетань, *3* – Цзяхэтань–Гоацунь, *4* – Гоацунь–Сунькоу, *5* – Сунькоу–Айшань, по [Особенности…, 2011]

перечного сечения и снижения уровней воды. Иными словами, понижение уровней ниже водохранилищ – результат не только врезания реки (глубинной эрозии), но и расширения русла. Поэтому знак равенства между величинами «посадки» уровней ΔH и понижения отметок дна Δz ставить нельзя. Тем не менее поперечные профили за 10-летний период (1999–2009) свидетельствуют о значительном углублении русла (пример такого профиля приведен на рис. 5).

Совместное появление врезания рек и размывов берегов, в результате чего расширяется русло, приводит к общему увеличению его пропускной способности, скорости течения и транспортирующей способности потока. Все это

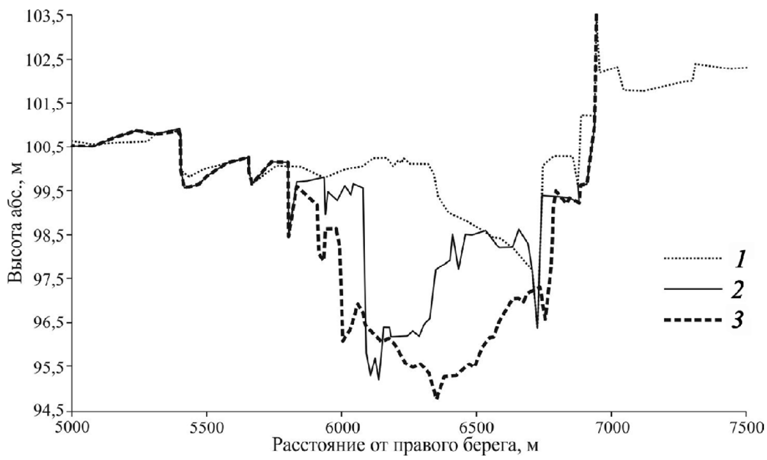

Рис. 5. Изменение поперечного профиля русла р. Хуанхэ ниже гидроузла Сяоланди: *1* – 1999 г.; *2* – 2004 г.; *3* – 2009 г.

(ниже г. Ичан), интенсивно меандрирует, чему способствует отвлечение стока воды (около 45% в 1950-е гг.) по многочисленным рукавам-ответвлениям в оз. Дантинху в восточной части равнины, образующим своеобразное пойменное проточно-озерное разветвление реки [Чалов и др., 2006]. Для уменьшения угрозы наводнений, а также сокращения водного пути многие самые крутые излучины были искусственно спрямлены, что привело к сокращению длины русла на 64 км в пределах равнины. Это вызвало смену направленной аккумуляции наносов на врезание реки со скоростью 10 см/год и понижение уровней воды в левом основном рукаве почти на 4 м [Xiangyang, 2004].

Таким образом, на понижении отметок дна русел Хуанхэ и Янцзы сказалось сужение пояса блуждания рек противопаводковыми дамбами по обоим берегам, а на Янцзы – еще и искусственное спрямление излучин.

Выводы:

– основным гидротехническим мероприятием на Янцзы и Хуанхэ в конце XX в. стало строительство крупных гидроузлов с водохранилищами, что привело к резкому изменению направлен-но-сти и темпов русловых деформаций в нижнем течении этих рек;

– особенности режима сработки/наполнения водохранилищ, связанные с гидроклиматическими условиями (сработка в многоводный паводочный летний период вплоть до полного опорожнения и наполнение в маловодную фазу водного режима зимой), обусловливают их промывку и вынос части влекомых наносов в нижние бьефы гидроузлов;

– врезание русла в нижнем бьефе гидроузлов на китайских реках из-за малой крупности отложений распространилось вниз по течению очень быстро (до 90 м/год) и достигло устьевых областей рек;

– большой сток наносов и лишь частичный перехват их водохранилищами обусловил отсутствие волны аккумуляции наносов перед фронтом врезания;

– врезание рек ниже водохранилищ, пришедшее на смену систематической аккумуляции наносов, сопровождается размывами берегов (особенно на Хуанхэ) и вместе с воздействием сужения пояса руслоформирования противопаводковыми дамбами, возводимыми на протяжении тысячелетий, и спрямлением излучин (на Янцзы) привело к снижению уровней воды в реках до 4 м, что обеспечило безопасность прилегающих территорий от наводнений.

Благодарность. Выполнено по темам плана НИР кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, за счет гранта РФФИ (проект № 15-05-03752), РФФИ–ГФЕН Китая (проект 16-55-53116) и программы Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-1010.2014.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беркович К.М. Русловые процессы на реках в сфере влияния водохранилищ. М., 2012. 163 с.

Векслер А.Б., Доненберг В.М. Переформирование русла в нижних бьефах крупных гидроэлектростанций. М.: Энергоатомиздат, 1983. 217 с.

Дегтярев В.В. Антропогенное изменение гидрологического режима и русловых процессов рек: Автореф. докт. дисс. М., 1992. 42 с.

Завадский А.С., Чалов С.Р., Лю Шугуан, Чжао Еань. Современные методы регулирования русел Хуанхэ и Янцзы // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 5. М.: МАКС-Пресс, 2010. С. 251–261.

Лапшенков В.С. Прогнозирование русловых деформации в бьефах речных гидроузлов. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 239 с.

Лю Шугуан. Сравнительный анализ русловых процессов на больших реках России и Китая: Автореф. канд. дисс. М., 1998. 23 с.

Лю Шугуан, Чалов Р.С., Чжао Еань. Русловые процессы в нижнем течении рек Янцзы и Хуанхэ после строительства гидроузлов // XXIV пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: Доклады и сообщения. М.; Арзамас: АГПИ, 2011. С. 225–226.

Маккавеев Н.И. Русловые процессы и путевые работы в нижних бьефах гидроузлов // Тр. ЦНИИЭВТ. 1957. Вып. 12. С. 5–86.

Особенности и тенденции развития русла и эрозионно-аккумулятивных процессов вниз по течению от водохранилища Сяоланди (р. Хуанхэ) // Реки и отложения наносов Китая. Чжэнчжоу: Изд. НИИ водного хозяйства р. Хуанхэ, 2011. 33 с. (на кит. яз.).

Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИЛЭЛ плюс, 2001. 300 с.

Транспортное использование водохранилищ. М.: Транспорт, 1972. 223 с.

Чалов Р.С., Власов Б.Н., Лю Шугуан и др. Специфические формы разветвленного русла р. Янцзы и их эволюция // География и природные ресурсы. 2006. № 2. С. 151–157.

Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. М., 2000. 212 с.

Babiński Z. Procesy erozyjno-akumulacy; ne pnizey stopnia wodnego Wloclawek. Torun, 1997. 150 s.

Babiński Z. Wplyw zapor na procesy kopytowe rzek aluwialnych. Bydgoszcz: Akad. Bydgoska im Kaz. Wilkiego, 2002. 185 s.

Graf W.L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers // Geomorphology. 2006. Vol. 79, pp. 336–360.

Kondolf G.M. Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels // Environ. Management. 1997. Vol. 21, no 5, pp. 533–551.

Li Guoying. Ponderation and Practice of the Yellow River Control. Yellow River Conservancy Press, 2003. 272 p.

Schmidt J.C., Wilcock P.R. Metrics for assessing the downstream effects of dams // Water Resours. Res. 2008. Vol. 44, pp. 1–19.

Series of picture albums of the Yellow river / Publication Center Yellow river conservancy commission, no 8. Beeigangzi Street / Chohgwen District. Beijng, 1991. 21 p.

Sou Lisheng. River Management and ecosystem conservation in China // Proceed. of the Ninth Intern. Symp. on River Sediment. Vol. 1. China: Tsinghua Univer Press, 2004, pp. 1700–1708.

Xiangyang N.U. Effects of artificial cutoffs in middle Yangtze reach // Proceed. of the Ninth Intern. Symposium on River Sediment. Vol. 3. China Tsinghua Univer Press. 2004, pp. 1692–1699.

Поступила в редакцию12.02. 2015
Принята к публикации 11.09.2015

R.S. Chalov[1], Zhao Yean[2], T.I. Volkova[3], Liu Shuguang[4], S.R. Chalov[5], A.S. Zavadsky[6]

INFLUENCE OF WATERWORKS FACILITIES ON CHANNEL PROCESSES IN THE LOWER REACHES OF THE HUANG HE AND YANGTZE RIVERS

Specific features of channel transformation are discussed for the largest rivers of China downstream the Three Gorges and Gezhouba waterworks on the Yangtze River and Sanmenxia and Xiaolangdi waterworks on the Huang He River which were put into operation during the end of the 20th century and the beginning of the 21st century. They differ from the rivers of Russia in reservoir regimes (decrease of storage during the summer high-water period and accumulation during the winter low-water period), high sediment yields, partly retention of bed load in reservoirs, practically total damming of rivers downstream the waterworks and other large-scale flood-control regulations. Different rates and forms of river incision, e.g. the absence of sediment accumulation in front of channel scour, were identified, as well as different stream-bank erosion processes and resulting channel widening typical mostly for the Huang He River. This is mainly the result of the narrowing channel-forming zone limited by the flood-control dams and the removal of meanders (on the Yangtze River). Positive effects of incision succeeding the sediment accumulation typical for the rivers before the waterworks construction are the reduction of dam failure risk and the lower probability of inundation of developed areas.

Keywords: channel processes, tail bay, water reservoir, sediment yield, incision, stream-bank erosion, the Huang He River, the Yangtze River.

Acknowledgement. The research was carried out according to the plan of scientific research of the Department of Land Hydrology and Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes and financially supported by the RFBR (project 15-05-037520 and the Presidential Programme of Support for the RF Leading Scientific Schools (SSc-1010.2014.5).

REFERENCES

Babiński Z. Procesy erozyjno-akumulacy; ne pnizey stopnia wodnego Wloclawek. Torun, 1997. 150 s.

Babiński Z. Wplyw zapor na procesy kopytowe rzek aluwialnych. Bydgoszcz: Akad. Bydgoska im Kaz. Wilkiego, 2002. 185 s.

Berkovich K.M. Ruslovye proccessy na rekah v sfere vliyaniya vodohranilisch [Riverbed processes in rivers influenced by reservoirs], Moscow. 2012. 163 p. (in Russian).

Chalov R.S., Vlasov B.N., Liu Shuguang et al. Specificheskie formy razvetvlennogo rusla r. Yangtze i ih evolyzia [Development of Yangtze river braided channel], Geografia i prirodnye resursy. 2006, no 2, pp. 151–157 (in Russian).

Chalov R.S., Liu Shuguang, Alexeevsky N.I. Stok nanosov i ruslovye processy bolshih rekah Russia i China [Sediment yield and channel processes on the largest rivers of Russia and China]. Moskow, 2000. 212 p. (in Russian).

Degtyarev V.V. Antropogennoe izmenenie gidrologicheskogo rezhima i ruslovyh processov rek [Anthopogenic changes of hydrological regime and in-channel processes]. Avtoref. doct. diss. Moscow, 1992. 42 p. (in Russian).

Graf W.L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers // Geomorphology. 2006. Vol. 79, pp. 336–360.

Kondolf G.M. Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels // Environ. Management. 1997. Vol. 21, no 5, pp. 533–551.

Lapshenkov W.S. Prognozirovfnie ruslovyh deformaciy v b'efah rechnyh gidrouzlov. [Channel changes predictions on large rivers of Russia and China], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1979. 239 p. (in Russian).

Li Guoying. Ponderation and Practice of the Yellow River Control. Yellow River Conservancy Press, 2003. 272 p.

Liu Shuguang. Sravnitelniy analiz ruslovyh processov na bolshih rekah Russia i China [Comparative study of channe; l processes on the largest rivers of Russia and China]. Avtoref. kand. diss. Moscow, 1998. 23 p. (in Russian).

Liu Shuguang, Chalov R.S., Zhao Y'an. Ruslovye processy v nizhnem techenii rek Yangtze i Huanhe posle stroitelstva gidrouzlov [Channel processes in the downstream reaches of Yellow and Yangtze rivers after dams construction]. XXIV plenarnoe mtzhvuzovskoe koordinacionnoe soveschanie po probleme erozionnyh, ruslovyh i ustevyh processov: Doklaly i soobschenia. AGPI, Moscov; Arzamas, 2011, pp. 225–226 (in Russian).

Makkaveev N.I. Ruslovye processy i putevye raboty v nizhnich b'efah gidrouzlov [Channel processes and training works below dams]. Tr. CNIIEVT, 1957. Vol. 12, pp. 5–86 (in Russian).

Osobennosti i tendencii razvitia rusla i erozionno-akkumulativnyh processov vniz po techeniy ot vodohranilischa Saolandi (r. Huanhe) [Development of channel and erosion and accumulation below Siolandi dam]. Reki i otloschenia nanosov China. Zhengzhou: izd. NII vodnogo hozyistva r. Yellov, 2011. 33 p. (in China).

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: rschalov@mail.ru

[2] Yellow River Institute of Hydraulic Research, China, Zhengzhou, Professor; *e-mail*: zys081@126.com

[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes, post-graduate student; *e-mail*: volkova_tatiana@inbox.ru

[4] Tongji University, China, Shanghai, Professor; *e-mail*: liusgliu@tongji.edu.cn

[5] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Senior Research Scientist, Ph.D. in Geography; *e-mail*: hydroserg@mail.ru

[6] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes, Leading Research Scientist, Ph.D. in Geography; *e-mail*: az200611@rambler.ru

Ruslovye processy i vodnye puti na rekah Obskogo basstina [Channel processes and waterways in the Obuiver bassin], Novjsibirsk, RIPEL plus, 2001. 300 p. (in Russian).

Schmidt J.C., Wilcock P.R. Metrics for assessing the downstream effects of dams // Water Resours. Res. 2008. Vol. 44, pp. 1–19.

Series of picture albums of the Yellow river / Publication Center Yellow river conservancy commission, no 8. Beeigangzi Street / Chohgwen District. Beijng, 1991. 21 p.

Sou Lisheng. River Management and ecosystem conservation in China // Proceed. of the Ninth Intern. Symp. on River Sediment. Vol. 1. China: Tsinghua Univer Press, 2004, pp. 1700–1708.

Transportnoe ispolzovanie vodohranilisch [Navigational use of water reservoirs], Moscov. Transport, 1972. 223 p. (in Russian).

Weksler A.B., Donenberg V.M. Pereformirovania rusla v nizhnich b'efah krupnyh gidroelectrostanciy [Channel changes below large hydropower dams], Moscov, Energoatomizdat, 1983. 217 p. (in Russian).

Xiangyang N.U. Effects of artificial cutoffs in middle Yangtze reach // Proceed. of the Ninth Intern. Symposium on River Sediment. Vol. 3. China Tsinghua Univer Press. 2004, pp. 1692–1699.

Zavadskiy A.S., Chalov S.R., Liu Shuguang, Zhao Y'an. Sovremennye metody regulirovaniya rusel Huanhe i Yangtze [River regulation of Yellow and Yangtze rivers]. Erozionnye i ruslovye processy. Vol. 5. Moscow, MAX-Press, 2010, pp. 251–261 (in Russian).

Received 12.02.2015
Accepted 11.09.2015