

УДК 551.438.5 627.157

К.М. Беркович<sup>1</sup>, Л.В. Злобина<sup>2</sup>, Л.А. Турыкин<sup>3</sup>

## ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ НАРУШЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РУСЕЛ РАВНИННЫХ РЕК

На основе полевых наблюдений на ряде рек России и анализа фондовых и литературных материалов изучены последствия длительных, в течение десятилетий, прямых нарушений подвижных русел рек крупными гидроузлами и русловыми карьерами, которые приводят к существенным изменениям такого важного фактора русловых деформаций как энергия руслового потока, которая выражается удельной мощностью и влекущей силой. Выявлены морфологические последствия создания гидроузлов на реках и разработки русловых карьеров, которые складываются из глубинной эрозии, нарушения взаимодействия поймы и русла, увеличения крупности донных наносов, трансформации продольного профиля реки на значительном расстоянии. Выявлено изменение энергетических характеристик потока по мере трансформации русла, которые определяют дальнейшее развитие процесса. Обнаружено, что в нижних бьефах плотин и на участках массовых русловых карьеров потенциал русловых деформаций с течением времени резко снижается вследствие уменьшения уклона и увеличения крупности донных наносов. В непосредственной близости от плотин на реках с исходно подвижным руслом за несколько десятилетий влекущая сила уменьшилась на порядок. Потенциал деформаций также меняется по длине нарушенных участков. Это способствует постепенному замедлению деформаций и ограничивает возможность восстановления русла. Реакция русла зависит от его исходной морфологии и гранулометрического состава руслообразующих наносов.

*Ключевые слова:* русловые процессы, антропогенные нарушения, подвижность русла, потенциал русловых деформаций.

**Введение.** Деятельность человека оказала на флювиальный рельеф и процессы его формирования огромное влияние. В результате деятельности человека и связанной с ней эрозией почв увеличился сток речных наносов [Methods ..., 1985; Hooke, 1994], что привело к масштабным нарушениям продольного профиля рек [Гришанин, 1974; Транспортное использование ..., 1972; Babicki, 2002]. Половина больших рек земли находится под влиянием различных инженерных сооружений и мероприятий. Благодаря им изменяется сток воды, режим поступления наносов и его транспорт реками, нарушается флювиальный рельеф, созданный в ходе длительной геологической истории, создаются новые искусственные формы рельефа на дне речных долин. Антропогенные изменения флювиального рельефа часто являются необратимыми и не имеют геологического прецедента.

Наиболее существенным нарушением руслоформирующей деятельности является развитие глубинной эрозии, сопровождающей многие виды деятельности. К настоящему времени, когда интенсивный антропогенный пресс насчитывает несколько десятилетий, актуальным является выявление количественных пространственно-временных аспектов трансформации речных русел. Мерой главных ведущих сил, действующих в русле, и потенциала потока выполнять работу по трансформации русла

является энергия потока. Анализ энергетических характеристик для участков рек, подвергнутых нарушению, позволяет количественно описать ход процесса трансформации русла, выявить стадии этого процесса и участки с различным потенциалом деформаций.

**Постановка проблемы.** Прямые нарушения создаются многими видами сооружений и мероприятий, которые служат для стеснения потока половодья, способствуют увеличению транспортирующей способности потока и локальному врезанию. Наиболее значимые последствия, меняющие направленность развития продольного профиля реки, создают плотины водохранилищ и крупномасштабная разработка русловых карьеров строительных материалов. Русла рек, в которых происходят направленные вертикальные деформации, относятся к неустойчивым. Термин «устойчивость (русла)» не имеет однозначной трактовки, это отмечал в своей работе К.В. Гришанин (1974). С одной стороны, он обозначает характер и скорость изменения положения русла в пространстве. С другой стороны, устойчивость русла трактуется как неизменность в течение продолжительного времени продольного профиля реки, когда нет ни эрозии, ни аккумуляции. Такую трактовку принимал К.В. Гришанин, она же принята в зарубежной литературе. Как известно, степень устойчивости русла в первом смысле характеризуется разно-

<sup>1</sup> Московский государственный университет, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов, ведущ. науч. с., докт. геогр. н.; *e-mail:* berkovich@yandex.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* zleonora@yandex.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* filigorod@list.ru

образными показателями, которые в большинстве случаев используют одни и те же аргументы (уклон, диаметр наносов, глубину, скорость течения, гидравлическую крупность), за исключением коэффициента стабильности Н.И. Маккавеева (1955), который ввел в свой показатель ширину русла, попытавшись связать вертикальные и горизонтальные деформации. Большую часть показателей можно трактовать в качестве показателей относительной устойчивости донных отложений (коэффициент Лохтина, число Шильдса, коэффициенты М.А. Великанова, Н.А. Ржаницына и другие). Обратная величина – относительная подвижность донных отложений. Применение этого термина позволяет избежать неоднозначности понимания термина «устойчивость», тем более, что нами рассматривается неустойчивое русло с меняющимся продольным профилем.

Геоморфологические последствия ниже плотин определены трансформацией стока воды и дефицитом стока наносов. К этим факторам добавляются противозерозионная устойчивость материала, слагающего дно и берега, поступление наносов из притоков и других источников, геологическое строение дна реки. Морфологические последствия складываются из глубинной эрозии, нарушения взаимодействия поймы и русла и увеличения крупности донных наносов. Н.И. Маккавеев [1957, Транспортное использование..., 1972] выделил в развитии процесса трансформации русла ниже плотин ряд стадий. Глубинная эрозия, обусловленная дефицитом наносов, начинаясь у плотины, постепенно распространяется вниз по реке. Данные свидетельствуют о нелинейном развитии врезания во времени [Simon, Rinaldi, 2006] при разных видах антропогенных нарушений. К настоящему времени средняя величина врезания ниже плотин на равнинных реках мира составляет 3,5 м [Babiński, 2002]. Заметные изменения происходят во взаимодействии русла и поймы. В результате регулирования стока и врезания прекращается затопление высоких уровней поймы, на разветвленных реках отмирают пойменные протоки и рукава.

Эрозия и понижение отметки продольного профиля дна происходит при разработке русловых карьеров. Это один из наиболее распространенных видов деятельности с первой половины XX века на многих реках всех континентов [Galay, 1983; Kondolf, 1997; Rinaldi, Wyzga, Surian, 2005; Беркович, 2005]. Влияние руслового карьера двоякое: разработка карьера в русле коренным образом меняет морфологию русла – его глубину и площадь поперечного сечения, так как единичный карьер представляет собой искусственную отрицательную форму руслового рельефа. С другой стороны, безвозвратное удаление из транспорта большого количества наносов создает их дефицит ниже по течению.

Если причиной врезания рек ниже плотин является искусственное прекращение стока наносов, то на участках карьеров природа трансформации русла более сложная. С одной стороны, это – увеличение объема русла землеройной техникой и создание «ловушек» для наносов, с другой – локальное уве-

личение уклона выше карьера и дефицит наносов ниже него. В процессе трансформации русла происходит изменение энергетических характеристик, которые определяют дальнейшее развитие процесса.

**Объекты и методы исследования.** Для выявления пространственно-временных особенностей изменения факторов формирования русла ниже плотин и в районах крупных русловых карьеров использованы материалы исследования нижних бьефов нескольких плотин на реках России, построенных в 1950–1960-х гг., а также исследований, проведенных начиная с 1991 г. на ряде рек России: Оке, Белой, Томи. В процессе исследований выполнялись детальные съемки и промерные работы, нивелировка водной поверхности, анализ ежедневных уровней воды по всем доступным гидрологическим постам, отбор проб донных грунтов. Трансформация русла выявлялась на основе сравнения разновременных планов и карт русла.

На основе материалов исследований вычислены удельная мощность потока, касательное напряжение, коэффициент подвижности русла и транспортирующая способность потока для условий среднего максимального расхода воды. Удельная мощность выражается:  $\varepsilon = \rho g Q I / B$ , где  $\rho$  – плотность воды ( $1000 \text{ кг/м}^3$ ),  $g$  – ускорение свободного падения  $9,8 \text{ м/с}^2$ ,  $Q$  – руслоформирующий расход воды  $\text{м}^3/\text{с}$  и  $I$  – уклон русла,  $B$  – ширина русла.

Влекущая сила на дне (параметр подвижности наносов) представляется числом А. Шильдса [Church, 2006]:

$$\theta = \frac{\tau_0}{g \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) d},$$

где  $\tau_0 = \rho g h I$  – касательное напряжение,  $\rho_s$  – плотность наносов,  $\text{кг/м}^3$ ;  $d$  – средний диаметр частиц наносов, м,  $h$  – глубина, м.

Применение числа Шильдса продиктованы несколькими обстоятельствами: 1 – есть возможность сравнивать полученные нами данные с зарубежными; 2 – хотя число Шильдса, как и большинство коэффициентов подвижности, дает относительную характеристику подвижности наносов, разработка А. Шильдса, а также отечественных и зарубежных исследователей, позволяет получить абсолютную характеристику подвижности путем отнесения реального числа Шильдса к его критическому значению, обозначающему начало движения частиц; 3 – число Шильдса входит в качестве аргумента в ряд формул, для вычисления расхода наносов, что позволяет, хотя и приближенно, определить изменение транспортирующей способности потока.

Соотношение действующего касательного напряжения с его критическим значением (начала движения частиц)  $X = \theta / \theta_c$ , характеризующее избыток влекущей силы, которая расходуется на размыв и транспорт наносов, служит показателем подвижности русловых наносов и аргументом в ряде формул

расчета расхода донных наносов. Критическое касательное напряжение  $\theta_c$  вычислено по зависимостям Ван Рейна [Алексеевский, Михинов, 1991]. На основании полученного коэффициента подвижности ( $\phi$ ) вычислен безразмерный расход донных наносов заданной крупности ( $\Phi$ ), то есть транспортирующая способность потока. В данной работе использована формула [Саменин, Larson, 2005]:

$$\Phi = 12\tau_p^{*1,5} \exp\left(-4,5 \frac{\tau_{cr}}{\tau_p}\right).$$

Для полноты анализа полезно привести некоторые данные по рекам, находящимся в основном в естественном состоянии (табл. 1). Для равнинных рек с песчаными наносами характерна небольшая удельная мощность, в противоположность рекам с врезанным руслом и крупными галечными наносами. Величины  $\theta$  на реках с песчаными наносами располагаются в диапазоне 0,6–1,4, а параметр подвижности  $\phi$  – 22–37. На реках Восточной Сибири с врезанными руслами и галечными наносами величины  $\theta$  и  $\phi$  соответственно равны 0,04 и 0,7–0,8. В табл. 1 приведен также коэффициент стабильности Н.И. Маккавеева ( $K_c = 10^2 d/BH$ ), который достаточно тесно коррелируется с  $\theta$  и  $\phi$ . Данные по рекам Северной Америки с ненарушенным режимом [Church, 2006; Simon, Rinaldi, 2006] показывают, что обычные величины  $\theta$  для песчаных русел находятся в диапазоне 0,3–10, а для галечных рек – 0,01–0,4. Параметр подвижности  $\phi$  рек с песчаными наносами достигает 44, а с галечными – 1,4.

ходным состоянием, что обусловлено уменьшением среднего максимального расхода. В то же время, число Шильдса ( $\theta$ ) уменьшилось практически на порядок: на Оби с 0,47 до 0,03, на Висле – с 1,18 до 0,14. Соответственно уменьшились подвижность русловых наносов и расход донных наносов. У Новосибирской плотины показатель подвижности уменьшился до  $\phi=0,54$ , что означает отсутствие потенциала врезания. У плотины Влоцлавек на Висле коэффициент подвижности уменьшился на порядок ( $\phi=3,5$ ), расход наносов – на 2 порядка, хотя потенциал размыва сохранился (Babiński, 1984). Значения  $\theta$  и  $\phi$  ниже Воткинской плотины на Каме через 30 лет эксплуатации составили соответственно 0,05 и 1,05. Эти величины характерны для естественных рек с крупнообломочными наносами и врезанным руслом. Отметим, что к настоящему времени величина врезания русла Оби, установленное путем сравнения поперечных профилей дна, у плотины Новосибирской ГЭС составило около 3 м, Камы у Воткинской плотины – 1,8 м, Вислы у Влоцлавекской плотины – 3,5 м [9].

Анализ распределения энергетических характеристик по длине реки ниже плотины позволяет выделить отрезки с разным потенциалом деформаций. Согласно имеющимся в литературе данным [Babiński, 2002, Galay, 1983], эрозия распространяется на десятки и сотни километров. Чаще всего ее распространение определяют по понижению водной поверхности при фиксированном расходе воды. Понижение уровня не всегда адекватно отвечает понижению дна вследствие эрозии, так как может быть

Таблица 1

Энергетические характеристики некоторых равнинных рек

Река	$\varepsilon$	$\theta$	$\phi$	$\Phi$	$K_c$	Тип русла
Верхняя Обь	7,32	0,75	24	6,5	0,29	Разветвленное, острова, осередки
Средняя Обь до регулирования	6,64	1,41	16	2,9	0,58	Разветвленное, острова
Висла до регулирования	6,96	1,18	37	14	0,35	Разветвленное осередки
Малая Северная Двина	2,8	0,61	20	4,6	0,42	Разветвленное, осередки
Средняя Лена	7,81	0,68	22	5,4	0,25	Разветвленное, острова
Инсар	12	0,95	31	9,5	2,0	Меандрирующее
Ветлуга	7,48	0,99	29	10	1,52	Меандрирующее
Верхняя Лена	20	0,04	0,7	0,0002	21,5	Врезанное галечное
Верхний Алдан	39	0,05	0,9	0,001	30,7	Врезанное галечное

### Результаты исследования и их обсуждение.

**Участки рек ниже больших плотин.** Представляет интерес сопоставление энергетических характеристик в непосредственной близости от плотин, которое характеризует их изменение за несколько десятилетий в конкретном створе. Так, в створах ниже Новосибирской плотины на Оби и плотины Влоцлавек на нижней Висле (реки сходные по исходной подвижности русла) удельная мощность потока спустя 30–50 лет эксплуатации этих плотин уменьшилась примерно на 20% по сравнению с ис-

следствием других нарушений и изменения формы поперечного сечения русла вследствие регулирования стока [Маккавеев, 1957].

Анализ распределения энергетических характеристик по длине выполнен для 110-километрового участка р. Оби ниже Новосибирской ГЭС. Повторные нивелировки водной поверхности позволили установить, что понижение уровня при расходе 1200 м<sup>3</sup>/с за 48 лет распространилось по Оби примерно на 60–70 км ниже Новосибирской плотины. Несмотря на 10–15%-ное уменьшение уклона, удельная мощность

потока остается в пределах значений, характерных для Оби в ненарушенном состоянии (в среднем  $6 \text{ Вт/м}^2$ ), достигая местами, в сужениях русла,  $19 \text{ Вт/м}^2$ . Однако параметр  $\theta$  и подвижность русла  $\phi$ , испытывают направленные изменения по длине реки. Самые низкие значения отмечаются на участке длиной около 30 км от плотины, где  $\theta$  принимают значения, характерные для галечных врезанных русел, а значения  $\phi$  показывают, что глубинная эрозия здесь уже невозможна. Ниже по течению  $\theta$  и  $\phi$  сначала резко, а затем плавно увеличиваются вниз по течению (табл. 2). Потенциал русловых деформаций достаточно быстро восстанавливается, а полный потенциал, свойственный естественным разветвленным песчаным руслам, достигается рекой в 100–110 км от плотины. Следует отметить, что транспортирующая способность потока, выраженная безразмерным расходом донных наносов, меняется по длине реки менее значительно, чем показатель подвижности.

В условиях р. Оби насыщение потока происходит за счет глубинной и боковой эрозии (врезание и аккумуляция на дне, размыв и наращивание берегов). Сравнение планов русла 1985 и 2004 гг. позволило оценить изменение объема русла, характеризующее процесс насыщения потока руслообразующими наносами. На приплотинном участке (0–30 км) наблюдается очень незначительный прирост годового объема стока наносов, который объясняется сравнительно небольшими размывами берегов при отсутствии глубинной эрозии. За пределами этого участка на фоне увеличения подвижности русла наблюдается резкий рост годового объема наносов. Объем наносов практически достигает транспортирующей способности потока [Алабян, Алексеевский, Беркович, 1992]. Таким образом, сток руслообразующих наносов восстанавливается за счет эрозии дна и берегов в пределах участка длиной 60–70 км.

**Участки рек с крупными русловыми карьерами.** Русловой карьер представляет собой искусственную отрицательную форму рельефа речного дна. Глубина на месте разработанного карьера на равнинных судоходных реках России (Оке, Белой, Оби, Каме) часто превышает в межень 10 м. В отличие от участков рек ниже плотин начальная трансформация русла чисто механическая.

Объем удаленного из русла материала существенно превышает полный сток наносов. Так, на верхней Оке (от Калуги до Коломны) на участке длиной 250 км за 20 лет (1970–1990 гг.) было удалено из русла более 50 млн  $\text{м}^3$  аллювиального материала. На участке р. Белой в 80–200 км вниз по течению от Уфы за 20 лет было извлечено более 20 млн  $\text{м}^3$  аллювия. При этом суммарный объем стока наносов Оки в Калуге за 1950–1980-е годы составил 18–20 млн  $\text{м}^3$ , из них на руслоформирующие наносы приходится от 5 до 30%, то есть реально на занесение карьеров и восстановление отметок дна могло быть израсходовано не более 5,5 млн  $\text{м}^3$  наносов.

Таблица 2

**Энергетические характеристики р. Оби  
ниже Новосибирской ГЭС**

Расстояние от плотины, км	Понижение уровня, м (начало-конец участка)	$\theta$	$\phi$	$\Phi$	Объем донных наносов, тыс. $\text{м}^3/\text{год}$
0–32	1,9–0,94	0,04	0,63	0,73	185,6
32–63	0,93–0,41	0,25	7,47	0,69	1146
69–73	0,35–0,31	0,29	8,59	1,41	1046
74–98	0,3–0,16	0,24	8,27	1,28	1336
100–110	0,14–0,1	0,37	12,36	1,34	–

Разработка русловых карьеров радикальным образом трансформирует продольный профиль реки на значительном расстоянии в результате регрессивной и трансгрессивной эрозии. Первая возникает вследствие местного увеличения уклона выше разработанного карьера [Kondolf, 1997]. Трансгрессивная эрозия обязана своим возникновением дефициту наносов, возникающему ниже карьера вследствие выпадения наносов из транзитного стока в карьерной выемке. Так как карьеры часто располагаются цепочкой, то эрозия развивается и между отдельными карьерами. За 60 лет активной добычи объем русла верхней Оки на 250-километровом участке при межennem уровне увеличился на 80%, треть этой величины составляет прирост объема русла между крупными карьерами, то есть за счет эрозии. Среднее понижение дна Оки превысило 2 м, а скорость врезания достигает местами 3 см в год. Среднее понижение дна р. Белой ниже Уфы за 30 лет составило почти 1,5 м.

Признаком трансформации продольного профиля является понижение минимальных годовых уровней воды ( $\Delta H$ ). В изученных случаях минимальные уровни с начала 1950-х гг. и до настоящего времени понижаются практически по линейной зависимости.

Трансформация русла привела к резкому изменению энергетических характеристик реки Оки (табл. 3). Характерно, что исходная подвижность русла в естественном состоянии, представленная по данным 1937–1938 гг., по всему изученному участку Оки была практически одинаковой независимо от морфологического типа русла: полого извилистого адаптированного русла между Калугой и Коломной и свободно меандрирующего русла в районе Рязани. По мере увеличения объема русла в ходе добычи и эрозии на верхней Оке произошло значительное уменьшение влекущей силы и подвижности русла, оцененной в целом по протяженным участкам. Для участка Калуга–Коломна характерно в целом очень значительное, в 3 раза, сокращение  $\theta$  и  $\phi$  за период активной добычи 1950–1990 гг., которое продолжилось и в последние 20 лет на фоне сокращения добычи. Это является результатом продолжающейся глубинной эрозии. Крайне низкие величины характеристик наблюдались на нижней Белой после 30-летнего периода активной добычи

Таблица 3

## Энергетические характеристики рек с карьерами

Год	$\epsilon$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\theta$	$\phi$	$\Phi$	$\Delta H$ , м	Объем добычи, млн м <sup>3</sup>
Ока – Калуга – Серпухов						
1937	7,2	0,41	14,4	3,07	–	–
1991	9,31	0,34	9,8	2,68	0,92	24,5
2010	7,54	0,14	3,33	0,25	1,36	4
Ока – Серпухов – Коломна						
1937	6,5	0,42	13,8	2,96	–	–
1992	4,35	0,103	2,6	0,26	1,67	29,9
2012	2,19	0,18	5,94	0,73	2,21	8
Ока – Рязань – Половское						
1938	6,02	0,44	12,7	2,73	–	–
1993	5,39	0,33	11,4	1,71	0,7	26,2
Белая – 80–200 км от Уфы						
1995	4,06	0,07	1,8	0,15	1,30	24

аллювия. Энергетические характеристики приблизились к значениям, характерным для врезанных, гравийно-галечных рек. Это означает значительное уменьшение потенциала русловых деформаций и в известной мере объясняет очень долгое время проявления отрицательных последствий.

В то же время на рязанском участке Оки  $\theta$  и  $\phi$ , хотя и уменьшились, но в меньшей степени, несмотря на большой объем добычи. Столь разная реакция характеристик подвижности русла на понижение дна связана с различиями в гранулометрическом составе донных наносов и морфологии русла. На Оке выше Коломны и на нижней Белой в аллювии велика доля крупных частиц, поэтому в ходе эрозии крупность наносов быстро увеличи-

вается, местами формируется отмостка, что приводит к уменьшению подвижности русла. На рязанском участке Оки состав наносов песчаный и более однородный, его укрупнение незначительно, и подвижность меняется мало. Меандрирование и слабая устойчивость берегов к размыву способствуют быстрому восполнению стока наносов.

Если рассмотреть распространение энергетических характеристик по длине реки, то видно (рис.), что наибольшее уменьшение энергетических характеристик отмечается на участках карьеров, тогда как на перекатных участках, разделяющих карьеры, они достаточно велики. Это означает, что на участках между карьерами сохраняется высокий потенциал русловых деформаций и можно ожидать дальнейшего врезания.

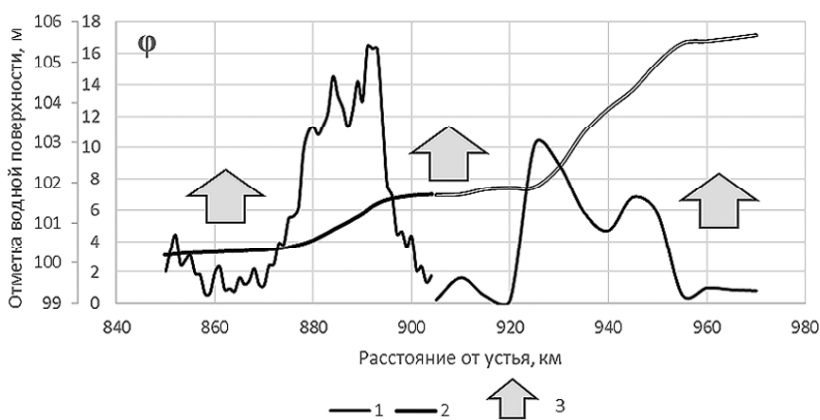
**Выводы:**

– длительные, в течение десятилетий, прямые нарушения подвижных русел рек крупными гидрозлами и русловыми карьерами приводят к существенным изменениям такого важного фактора русловых деформаций как энергетические характеристики потока – влекущая сила и транспортирующая способность потока. Это обусловлено увеличением крупности руслообразующих наносов и уменьшением уклона;

– в непосредственной близости от плотин гидрозлов значения энергетических характеристик понижаются до величин, характерных для рек с галечно-валунным руслом. Разветвленные реки, отличавшиеся исходной большой подвижностью русла, сравнительно быстро восстанавливают сток руслообразующих наносов ниже плотин, так что участок, на котором русло становится неразмываемым, сравнительно короткий. Если горизонтальные деформации ограничены вследствие строения берегов или искусственным образом (сооружениями), энергетические характеристики снижаются на расстоянии, составляющем несколько десятков и даже превышающем сто километров;

– при многолетней интенсивной разработке русловых карьеров на реках развивается резкая глубинная эрозия. В результате на больших участках рек энергетические характеристики потока при руслоформирующем расходе резко изменяются в сторону уменьшения. Это, с одной стороны, является причиной постепенного замедления врезания, но с другой стороны ограничивает возможность восстановления русла;

– реакция русла зависит от гранулометрического состава руслообразующих наносов и морфологии. В условиях прямолинейного или слабоизвилистого русла с устойчивыми берегами и неоднородными наносами транспортирующая способность потока при врезании сокращается в максимальной



Подвижность русла р. Оки на участке от Серпухова до Коломны. Обозначения: 1 – подвижность русла  $\phi$ ; 2 – продольный профиль реки; 3 – участки русловых карьеров

Fig. Riverbed mobility of the Oka River at the Serpukhov-Kolomna section. 1- riverbed mobility  $\phi$ ; 2 – longitudinal profile of the river; 3 – sites of riverbed quarries

степени. Потенциал русловых деформаций сохраняется только на участках между крупными карьерами, представляющими собой группы перекаатов. На участках с однородными песчаными наносами

уменьшения энергетических характеристик не происходит даже при большом объеме добычи. Дефицит стока наносов восполняется за счет размыва берегов.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках темы НИР НИЛ эрозии почв и русловых процессов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алабян А.М., Алексеевский Н.И., Беркович К.М.* Транспорт наносов в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС // Тр. Зап. Сиб. НИИ. 1992. Вып. 98. С. 79–89.
- Алексеевский Н.И., Михинов А.Е.* Формирование и динамика наносов в речной сети и береговой зоне водоемов // Итоги науки и техники. Гидрология. Т. 8. М.: ВИНТИ, 1991. 184 с.
- Беркович К.М.* Русловые процессы и русловые карьеры. М., 2005. 109 с.
- Гришанин К.В.* Устойчивость русел рек и каналов. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 144 с.
- Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
- Маккавеев Н.И.* Русловые процессы и путевые работы в нижних бьефах гидрозлов // Тр. ЦНИИЭВТ. 1957. Вып. 12. С. 5–86.
- Транспортное использование водохранилищ. М.: Транспорт, 1972. 223 с.
- Alabian A.M., Alexeevskij N.I., Berkovich K.M.* Transport nanosow w nizhnim biefe Novosibirskoj GES [Sediment transport downstream of Novosibirsk Hydropower station] // Trudy Zap. Sib. NI. 1992. V. 98. P. 79–89 (in Russian).
- Alexeevskij N.I., Mikhinov A.E.* Formirovanie i dinamika nanosov v rechnoy seti i beregovoj zonie vodoemov. Itogi nauki i tehniki. [Sediment forming and dynamics in river network and coastal zones of reservoirs. Basis of science and technique] // Gidrologia. Tom. 8. M. VINITI. 1991, 184 p. (in Russian).
- Babiński Z.* The effects of human activity on changes in the Lower Vistula channel // Geographia Polonica. 1984. V. 50. P. 271–282.
- Babiński Z.* Wpływ zapór na procesy korytowe rzek aluwialnych ze szczególnym uwzględnieniem stopnia wodnego «Wiociawek» // Wydawnictwo Akademii Bydgoskiej, Bydgoszcz, 2002. 185 p.
- Berkovich K.M.* Ruslovyye processy i reslovyye kariery. [Channel processes and in-stream mines]. M. 2005, 109 p. (in Russian).
- Billi P., Rinaldi M.* Human impact on sediment yield and channel dynamics in the Arno River basin (central Italy) // Human Impact on Erosion and Sedimentation. IAHS Publ. 1997. N 245. P. 301–311.
- Camenen B., Larson M.* A general formula for non-cohesive bed load sediment transport // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2005. V. 63. P. 249–260.
- Church M.* Bed Material Transport and the Morphology of Alluvial River Channels // The Annual Review of Earth and Planetary Science. 2006. V. 34. P. 325–354.
- Galay V.J.* Causes of river bed degradation // Water Resources Research. 1983. V. 19. P. 1057–1090.
- Grishanin K.V.* Ustojchivost rusel rek i kanalov. [Rivers and canals channel stability]. L. Gidrometeoizdat. 1974, 144 p. (in Russian).
- Hooke R.* On the efficacy of humans as geomorphic agent // GSA Today. 1994. V. 4. N 9. P. 223–225.
- Kondolf G.M.* Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels // Environmental Management. 1997. V. 21. N 4. P. 533–551.
- Makkaveiev N.I.* Ruslovyye processy i putevyye raboty v nizhnih biefaх gidrozlov [Riverbed processes and navigational works downstream of dams] // Trudy TsNIIEVT. 1957. Vyp. 12. P. 5–86 (in Russian).
- Makkaveiev N.I.* Ruslo reki i erozia w ee bassejnie. River channel and erosion in its watershed]. M. Izdatelstvo AN SSSR. 1955, 346 p. (in Russian).
- Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs / Ed.: S. Bruk. Paris, Unesco, 1985. 224 p.
- Rinaldi M., Wyzga B., Surian N.* Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives // River research and applications. 2005. N 21. P. 805–828.
- Simon A., Rinaldi M.* Disturbance, stream incision, and channel evolution: The roles of excess transport capacity and boundary materials in controlling channel response // Geomorphology. 2006. N 79. P. 361–383.
- Transportnoie ispolzovanie vodohranilishch. [Transport use of reservoirs]. M. Transport. 1972, 223 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 05.03.2015  
Принята к публикации 27.09.2016

**K.M. Berkovich<sup>1</sup>, L.V. Zlotina<sup>2</sup>, L.A. Turykin<sup>3</sup>**

#### NATURAL AND ANTHROPOGENIC DISTURBANCES OF THE CHANNEL FORMATION ON LOWLAND RIVERS

The effects of long-term (over the decades) direct violations of the movable riverbeds by major waterworks and in-stream quarries were studied basing on field observations at several Russian rivers and the analysis of publications. They led to significant changes of the energy of channel flow, characterized by specific power and the tractive force, which is an important factor of channel deformations. Morphological consequences of the hydroelectric facilities construction and the in-stream quarrying, such as riverbed degradation and scour, floodplain and riverbed disconnection, increase of the bed sediment size, transformation

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; *e-mail*: berkovitch@yandex.ru

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: zleonora@yandex.ru

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: filigorod@list.ru

of the longitudinal profile of the river at a considerable distance, etc. were revealed. The process of the channel transformation is accompanied by the changes in flow energy characteristics, which determine the further development of the process itself. Downstream of dams and at the sites of vast in-stream quarries the riverbed deformation potential is drastically reduced over time due to the grade reduction and the increase of bed sediment size. In the immediate vicinity of dams on the rivers with initially mobile bed, the tractive force decreases by an order of magnitude during a few decades. The deformation potential also varies along the course of the disturbed river reaches. This contributes to the gradual slowing of the deformations and limits the possibility of riverbed recovery. The channel response depends on its initial morphology and bed sediment composition.

*Key words:* channel processes, anthropogenic disturbance, riverbed mobility, channel deformation potential.

*Acknowledgements.* The study was carried out under the state budget theme of research of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes.

## REFERENCES

- Alabian A.M., Alexeevskij N.I., Berkovich K.M.* Transport nanosow w nizhnim biefe Novosibirskoj GES [Sediment transport downstream of Novosibirsk Hydropower station] // Trudy Zap. Sib. NII. 1992. V. 98. P. 79–89 (in Russian).
- Alexeevskij N.I., Mikhinov A.E.* Formirovanie i dinamika nanosov v rechnoy seti I beregovoy zonie vodoemov. Itogi nauki i tehniki. [Sediment forming and dynamics in river network and coastal zones of reservoirs. Basis of science and technique] // Gidrologia. Tom. 8. M. VINITI. 1991, 184 p. (in Russian).
- Babiński Z.* The effects of human activity on changes in the Lower Vistula channel // Geographia Polonica. 1984. V. 50. P. 271–282.
- Babiński Z.* Wpływ zapór na procesy korytowe rzek aluwialnych ze szczególnym uwzględnieniem stopnia wodnego «Wiociawek» // Wydawnictwo Akademii Bydgoskiej, Bydgoszcz, 2002. 185 p.
- Berkovich K.M.* Ruslovyie processy i reslovyie kariery. [Channel processes and in-stream mines]. M. 2005, 109 p. (in Russian).
- Billi P., Rinaldi M.* Human impact on sediment yield and channel dynamics in the Arno River basin (central Italy) // Human Impact on Erosion and Sedimentation. IAHS Publ. 1997. N 245. P. 301–311.
- Camenen B., Larson M.* A general formula for non-cohesive bed load sediment transport // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2005. V. 63. P. 249–260.
- Church M.* Bed Material Transport and the Morphology of Alluvial River Channels // The Annual Review of Earth and Planetary Science. 2006. V. 34. P. 325–354.
- Galay V.J.* Causes of river bed degradation // Water Resources Research. 1983. V. 19. P. 1057–1090.
- Grishanin K.V.* Ustojchivost rusel rek I canalov. [Rivers and canals channel stability]. L. Gidrometeoizdat. 1974, 144 p. (in Russian).
- Hooke R.* On the efficacy of humans as geomorphic agent // GSA Today. 1994. V. 4. N 9. P. 223–225.
- Kondolf G.M.* Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels // Environmental Management. 1997. V. 21. N 4. P. 533–551.
- Makkaveiev N.I.* Ruslo reki i erozia w ee bassejnie. River channel and erosion in its watershed]. M. Izdatelstvo AN SSSR. 1955, 346 p. (in Russian).
- Makkaveiev N.I.* Ruslovyie processy i putevyie raboty v nizhnih biefah gidrouzlov [Riverbed processes and navigational works downstream of dams] // Trudy TsNIEVT. 1957. Vyp. 12. P. 5–86 (in Russian).
- Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs / Ed.: S. Bruk. Paris, Unesco, 1985. 224 p.
- Rinaldi M., Wyzga B., Surian N.* Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives // River research and applications. 2005. N 21. P. 805–828.
- Simon A., Rinaldi M.* Disturbance, stream incision, and channel evolution: The roles of excess transport capacity and boundary materials in controlling channel response // Geomorphology. 2006. N 79. P. 361–383.
- Transportnoie ispolzovanie vodohranilishch. [Transport use of reservoirs]. M. Transport. 1972, 223 p. (in Russian).

Received 05.03.2015

Accepted 27.09.2016