

*К.М. Беркович, Л.В. Злотина*

### РЕЛАКСАЦИЯ РУСЛА ВЕРХНЕЙ И СРЕДНЕЙ ОКИ<sup>3</sup>

*K.M. Berkovich, L.V. Zlotina*

### THE UPPER AND MIDDLE OKA RIVER CHANNEL RELAXATION

*Рассмотрены вопросы релаксации русла р. Оки после окончания интенсивной разработки русловых карьеров. Она происходит путем занесения карьеров при одновременном размыве выше и ниже по течению. Анализ изменения отметок дна проводился путем сравнения планов русла. За период 1950 – 1990 гг. из русла реки было безвозвратно удалено не менее 100 млн м<sup>3</sup> аллювиального материала, а с середины 1990-х годов, разработка карьеров была уменьшена или прекращена. Выявлены размеры эрозии выше и ниже карьеров и объемы аккумуляции в карьерах. Обнаружено, что восстановления отметок дна не произошло. Показан механизм развития глубинной эрозии выше карьера.*

*The issue on the Oka River channel relaxation on intense bed material excavation completion is considered. It occurs by underwater sand/gravel-pit siltation and synchronous upstream and downstream bed erosion. The changes to bed elevation were analyzed by means of riverbed maps comparison. More than 100 mln. m<sup>3</sup> of alluvial material was excavated irretrievably out of the riverbed within 1950 – 1990. Since the middle 1990s underwater mining was reduced or even ceased. The bed erosion size both upstream and downstream of sand/gravel-pits was discovered as well as the material storage in the pits. It was revealed that the initial bed elevation has not been recovered. The mechanism initiating retrogressive bed erosion was displayed.*

Вопросы восстановления исходного состояния рек после окончания интенсивного антропогенного воздействия представляют большой интерес, так как от этого зависит дальнейшее использование рек, необходимые инженерные мероприятия для смягчения последствий и, в конечном итоге, экономические затраты.

Выделяются прямые и косвенные нарушения русел рек. К первым относятся разработка русловых карьеров, а также дноуглубительные и выправительные работы. Вторые включают в себя разного происхождения изменения стока воды и наносов в бассейне реки. Реакция русла на прямые механические нарушения существенно отличается от реакции русел рек на изменения стока воды или наносов. Релаксационные процессы при косвенных антропогенных нарушениях сходны с реакцией русла на изменения природной среды, только развиваются гораздо быстрее. Они заключаются в возникновении направленных деформаций – эрозии или аккумуляции, охватывающих значительную часть речной системы и распространяющихся по ней, как правило, трансгрессивно – верховьев к низовьям.

<sup>3</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 04-05-64574.

При разработке русловых карьеров, по мере удаления большего или меньшего слоя руслообразующего аллювия, в русле искусственно вырабатываются глубокие емкости, занимающие иногда всю ширину русла и достигающие в длину несколько километров. Быстрое увеличение площади поперечного сечения русла, в основном за счет его глубины, и удаление руслообразующих наносов являются причиной возникновения трансформации русла. Характерно, что при разработке карьеров развиваются разнонаправленные деформации: одновременно происходит аккумуляция наносов в разработанных выемках и размыв дна выше и ниже них. Исследования русла р. Оки позволяют осветить механизм релаксации.

Участок верхней и средней Оки от г. Калуги до с. Половского длиной около 400 км относится к рекам, в очень значительной степени измененным разработкой русловых карьеров. За период с начала 1950-х по начало 1990-х годов из русла реки было безвозвратно удалено не менее 100 млн м<sup>3</sup> аллювиального материала: песка, гравия, мелкой гальки. Эта величина сопоставима с более чем стократным годовым стоком взвешенных наносов. Впоследствии, с середины 1990-х годов, разработка карьеров была существенно уменьшена или даже прекращена.

Река Ока в верхнем течении от Калуги до впадения р. Москвы протекает в сравнительно узкой долине, пойма распространена фрагментарно и имеет большую высоту. Русло реки в основном прямолинейное или слабо извилистое, устойчивое и морфологически близкое к врезанным. Средний уклон реки составляет 0,08 ‰, средняя крупность русловых наносов 3 – 5 мм. Ниже впадения р. Москвы долина реки расширяется, русло меандрирует, его устойчивость снижается вследствие существенно меньшей крупности наносов – 0,4 – 0,8 мм.

О реакции русла на механические нарушения можно судить по изменению отметок дна и водной поверхности. Данные о последних более доступны и широко применяются для анализа изменений продольного профиля рек. Вместе с тем на уровни воды действует большое количество факторов, в том числе многолетние колебания водоносности. Так, Н.И. Алексеевский и А.Г. Ободовский [Алексеевский, 2005] выявили обратную зависимость скорости и знака изменения уровней за многолетний период от нормированного изменения суммы модульных коэффициентов стока. Эта зависимость подтверждает идею Н.И. Маккавеева [Маккавеева, 1955] о том, что увеличение величины стока в долговременном плане приводит к врезанию рек. Водоносность р. Оки в межень постоянно увеличивается на протяжении всего XX и начала XXI вв. При этом минимальные уровни воды в Кашире и Калуге за период с конца XIX в до конца 1940-х гг., т.е. до начала массовой разработки карьеров, понизились приблизительно на 30 – 50 см, (на 0,6 – 0,8 см в год). Особенно отчетливо проявился природный тренд понижения минимальных уровней в Кашире (табл. 1).

Таблица 1

## Изменение минимальных уровней р. Оки

Годы	Изменение уровней, м (с нарастающим итогом)		
	Калуга	Кашира	Рязань (с 1930 г.)
1880 – 1930	-0,16	-0,52	
1950	-0,02	-0,41	0,06
1970	-0,60	-1,35	0,26
1995	-1,09	-2,18	0,08
2002	-1,23	-2,54	-0,64
2004	-0,84	-2,04	-1,38

Иной характер изменения уровней воды наблюдается в Рязани, где до начала разработки карьеров (начало 1970-х годов) на фоне увеличения водоносности уровни воды росли со скоростью до 0,9 см/год. В период разработки карьеров и после него средняя скорость понижения уровней в Калуге и Кашире резко возрастает и при продолжающемся увеличении меженной водоносности достигает 4 см в год. Характерно, что, несмотря на значительное ограничение и прекращение разработки карьеров, скорость понижения уровней не уменьшается со временем. Ход минимальных уровней за период разработки карьеров и после него описывается линейной зависимостью с коэффициентом корреляции 0,93. В начальный период разработки карьеров на средней Оке, в течение еще 5 – 7 лет, уровни воды продолжали расти, зато впоследствии, с начала 1980-х гг., они резко понижаются до настоящего времени со средней скоростью 4 см/год. Таким образом, следствием разработки многочисленных карьеров в русле р. Оки явилась трансформация продольного профиля реки, которая выразилась в понижении отметок водной поверхности на гидрологических постах Калуга, Кашира и Рязань. Максимум понижения водной поверхности в межень наблюдается в районе Каширы, где оно составляет 1,8 – 2,0 м за указанный период. При этом, если в Калуге и Кашире понижение уровней из-за разработки карьеров наследовало естественную тенденцию, то в Рязани – противодействовало ей.

Анализ изменения отметок дна проводился по последовательным планам перекаатов, прилегающих к крупным карьерам: Ланьшинскому выше г. Серпухова и Мутеновскому выше г. Каширы. Первый разрабатывался в 1980-е – начале 1990-х годов, второй – в 1970 – 80-е годов. Еще в период разработки Ланьшинского карьера на прилегающем сверху по течению участке длиной 700 м наблюдалась глубинная эрозия. Среднее понижение отметок дна на этом отрезке составило 57 см. В последующий период шло довольно интенсивное занесение вершины карьера: к 2004 г. в нем отложилось около 700 тыс. м<sup>3</sup> наносов, т.е. порядка 100 тыс. тонн в год. В этот же период выше карьера продолжается интенсивная эрозия. Среднее понижение отметки дна составило около 90 см или 7,5 см в год. В ходе релаксационных процессов восстановления отметок дна не произошло: по сравнению с исходным состоянием они

понизились на 1,5 м. То же относится к перекатному участку, расположенному ниже карьера, где отметки дна понижались в период разработки карьера на 6 см/год. Позднее размыв замедлился, и к 2004 г. понижение отметок дна составило только 12 см. Вероятно, замедление глубинной эрозии связано с увеличением устойчивости донных отложений вследствие выноса мелких фракций наносов.

Выше Мутеновского карьера наиболее интенсивное понижение отметок дна происходило в период разработки карьера (1979 – 1992 гг.), когда оно в среднем составило 1,2 м или 9 см в год. Затем понижение отметок дна замедлилось до 3 см в год, а в последние 4 года идет повышение отметок дна со скоростью до 3 см в год. Количественные показатели аккумуляции в карьерах и эрозии выше них приведены в табл. 2. Они отнесены к отрезкам русла длиной 1 км. Видно, что в одном случае наблюдалось увеличение скорости эрозии по мере занесения карьера, а в другом – произошла аккумуляция наносов.

Таблица 2

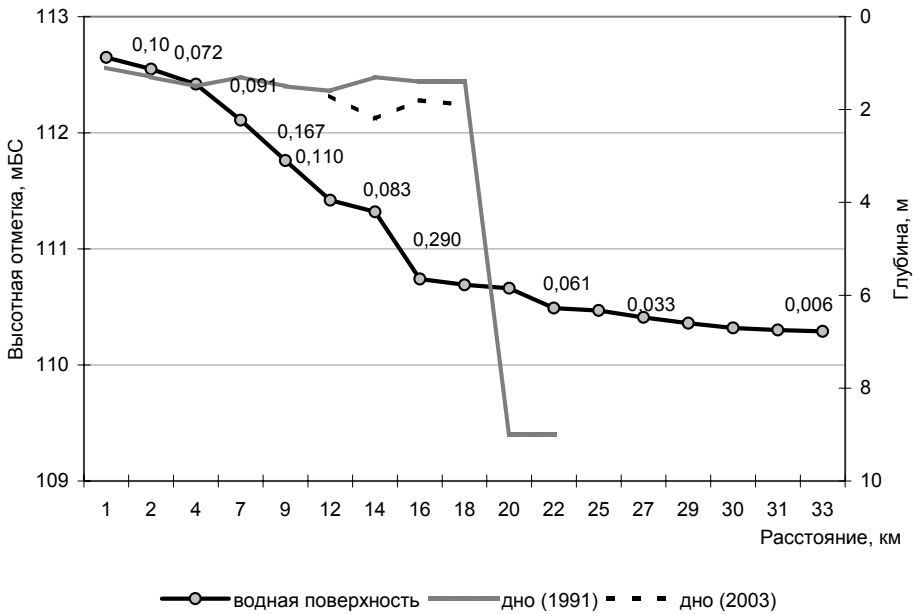
**Изменение приведенной глубины р. Оки**

Год	Глубина от проектного уровня, м				
	Кашира		Серпухов		
	карьер	выше карьера	карьер	выше карьера	ниже карьера
1973	2,29	1,53	2,10	1,29	1,62
1979	4,68	1,61	1,58	2,05	1,51
1992	5,75	2,82	7,48	1,86	2,58
2002	4,38	2,69	3,07	2,20	2,44
2003	3,74	2,61	3,03	2,73	2,20
2004	3,26	2,47	2,62	2,81	2,70
Общее изменение отметки дна	-1,00	-0,95	-0,52	-1,52	-1,08
в период разработки	-3,44	-1,29	-5,38	-0,57	-0,96
после разработки	2,49	0,35	4,86	-0,95	-0,12

Механизм возникновения трансгрессивной эрозии ниже карьеров достаточно ясен. Отработанный карьер представляет собой ловушку (отстойник) для наносов не только руслообразующих, но и части взвешенных, и их отложение в карьере приводит к возникновению дисбаланса наносов и развитию глубинной эрозии ниже по течению. Выемки карьеров представляют собой очень большие емкости, и заполнение их наносами, даже после окончания разработки, требует длительного времени. Так, средняя скорость увеличения глубины в Ланьшинском карьере в районе г. Серпухова на стадии его разработки составляла более 30 см/год, а в районе Каширы – до 90 см/год. При этом с одного километра русла удалялось до 250 – 300 тыс. м<sup>3</sup> наносов в год.

Занесение карьера идет со скоростью в 3-4 раза меньшей. При разработке карьеров за счет увеличения средней и максимальной глубины очень быстро механически увеличивается площадь поперечного сечения русла, при этом уничтожаются естественные формы руслового рельефа.

Механизм развития глубинной эрозии выше карьера, вероятно, заключается в формировании кривой спада при высоких уровнях воды. Ее возникновение может быть связано с резким увеличением площади поперечного сечения русла в карьере. Это – известное гидравлическое явление увеличения местных потерь энергии при внезапном расширении, которое пропорционально приращению площади сечения. Так, на участке русла Оки у Серпухова наблюдалось пяти-семикратное увеличение площади поперечного сечения в карьере по сравнению с вышележащим отрезком. Величина коэффициента местного сопротивления могла здесь достигать 25, что должно вызывать соответствующее увеличение уклона и скоростей течения. Детальные нивелировки водной поверхности выше одного из карьеров на Оке в районе г. Алексина выявили трехкратное увеличение уклона (см. рисунок).



Профили водной поверхности и дна выше карьера у г. Алексина на р. Оке (цифрами обозначены уклоны, %).

Похожие обстоятельства отмечены ранее на р. Томи выше г. Томска, где кривая спада ярко проявилась в процессе разработки карьеров, правда там выраженность кривой спада усилена особенностями геологического строения ложа реки – наличием скального выступа дна [Беркович, 2005]. Рост скоро-

стей в зоне гидравлического спада способствует развитию глубинной эрозии, которая, очевидно, наиболее интенсивна на конечном этапе разработки карьера. По мере занесения карьера интенсивность глубинной эрозии снижается по двум причинам: уменьшения выраженности кривой спада и смещения кривой спада вниз по течению. Уменьшение скорости понижения отметки дна выше карьеров по мере занесения карьеров отчетливо видно из данных табл. 2. Характерно, что как кривая спада, так и эрозия ярче выражены в районе г. Серпухова и выше него по течению. В районе г. Каширы размыв даже сменился небольшой аккумуляцией. Это связано с разным морфологическим строением рассматриваемых участков русла: в районе Серпухова и выше по течению долина реки узкая, глубоко врезанная, с выходами скальных пород в основании правого берега, стабильными каменистыми перекатами. Ширина русла не превышает 150 – 200 м, высота узкой поймы составляет 7 – 8 м, так что в половодье поток концентрируется чаще всего в пределах русла, не выходя на пойму. В этих условиях кривая спада выражена значительно отчетливее. В то же время в районе Каширы ширина русла увеличивается до 300 м, встречаются крупные массивы поймы, высота которой уменьшается до 5 – 6 м. Перекааты этого участка, хотя и сложены гравийно-песчаным материалом, все же достаточно подвижны. Это способствует сглаживанию неровностей продольного профиля.

### ***Литература***

1. *Алексеевский Н.И., Ободовский А.Г., Самохин М.А.* Механизмы изменения уровней воды в реках // Эрозионные и русловые процессы. – М., 2005, вып. 4, с. 216–237.
2. *Беркович К.М.* Русловые процессы и русловые карьеры. – М., 2005. – 109 с.
3. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 346 с.