

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ГЕОМОРФОЛОГИЯ

УДК 551.435.13:551.438.5:622.2(282.247.412)

© 2016 г. К.М. БЕРКОВИЧ, Л.В. ЗЛОТИНА, Л.А. ТУРЫКИН

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ РЕКИ ОКИ
В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННЫХ НАРУШЕНИЙ РУСЛА

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия
e-mail: berkovitch@yandex.ru*

На основе анализа картографических материалов и данных гидрологических наблюдений, а также детальных исследований русловых процессов верхней Оки, проведенных в 1990-е годы и продолженных в 2010–2015 гг., установлено, что на продольный профиль реки существенное воздействие оказали антропогенные нарушения русла – разработка русловых карьеров аллювиальных строительных материалов, сосредоточенных в среднем течении реки – 400–800 км от истока. Изменение морфометрических характеристик русла и дефицит наносов привели к развитию глубинной эрозии. Для выявления роли антропогенных нарушений в формировании продольного профиля реки, в соответствии с подходом Н.И. Маккавеева, выполнены расчет выработанного продольного профиля и его сравнение с реальным. Распределение уклона как по всей реке, так и на отдельных характерных участках определялось путем вычисления индекса, предложенного Дж. Хаком. Максимальные величины индекса уклона отмечены на отрезке с наибольшими механическими изменениями русла – между Калугой и Коломной. На этом участке реки еще в конце 1930-х гг. продольный профиль в главных чертах практически совпадал с расчетным выработанным. Однако механические изменения русла и сопровождающая их глубинная эрозия привели к тому, что на фоне общего снижения отметок профиля он стал невыработанным, и можно ожидать деформаций, направленных на его восстановление. В результате с начала 1990-х годов ухудшились условия судоходства, затрудились эксплуатация водозаборных сооружений и подводных переходов трубопроводов, река теряет рекреационное значение.

Ключевые слова: русловые процессы, продольный профиль реки, антропогенные нарушения.

Введение

Продольный профиль реки – весьма чувствительный индикатор всех изменений окружающей среды, которые прямо или косвенно вызывают трансформацию режима речного стока. Продольный профиль водной поверхности, характеризующий изменения вдоль реки гидравлического уклона, позволяет представить одну из основных характеристик русла, определяющую энергию потока. Приближенным показателем энергии потока может служить произведение расхода воды (Q) на уклон (I) – величина, пропорциональная мощности потока на единицу длины.

Продольный профиль реки в естественных условиях характеризуется, как правило, неравномерным распределением уклона. Это обусловлено рядом факторов: 1) неоднородностью прочности прорезаемых рекой пород, 2) поступлением наносов, особенно крупных, из притоков, 3) тектоническими движениями, 4) изменением базиса эрозии, 5) деятельностью человека. Последнее особенно важно при анализе участков русла, подвер-

женных интенсивным антропогенным нарушениям. Продольный профиль реки можно рассматривать в разных пространственно-временных масштабах: всей реки от истока до устья или конкретного участка реки, в пределах которого существуют некоторые особые условия для режима стока воды и наносов. В пределах полного продольного профиля р. Оки выделяются три крупных участка, различающихся по форме и характеристикам продольного профиля, а также уровню и типу антропогенных нарушений. В верховьях, от истока до впадения реки Угры, продольный профиль вогнутый и достаточно гладкий, без каких-либо перегибов и аномалий. Степень вогнутости профиля, отражающая скорость уменьшения уклона по длине реки, имеет высокие значения, причем наибольший прогиб профиля располагается примерно в 120–150 км от истока. Начиная от впадения р. Угры, продольный профиль реки отличается практически прямолинейной формой. Для участка ниже Калуги характерны значительные антропогенные нарушения русла, которые сказались на форме и развитии продольного профиля реки, что затрудняет ее практическое использование: эксплуатацию водного пути, водозаборных сооружений, подводных переходов трубопроводов.

Выработанный продольный профиль реки

Для характеристики продольного профиля применяют разные теоретические подходы. Широко используется закономерность, в общем виде описывающая расход наносов: $Q_s = KQ^m I^n$, где K – эрозионный коэффициент, m и n – эмпирические показатели степени. Н.И. Маккавеев [1] предложил приближенную зависимость между продольным уклоном и руслоформирующим расходом воды:

$$I = K_0/Q^{2/3}. \quad (1)$$

Коэффициент K_0 зависит от крупности руслообразующих наносов, шероховатости и формы русла.

Термин “выработанный продольный профиль” введен Н.И. Маккавеевым [1] как альтернатива принятому в западной литературе термину “профиль равновесия”. Условие равновесия, при котором русло пропускает расход воды и наносов, не изменяя своей формы, часто представляют в виде качественного принципа Э. Лейна [2]: $QI \propto Q_s d$, где Q_s – расход наносов, d – средняя крупность наносов. Равновесным профилем считают тот, при котором не происходит направленной эрозии или аккумуляции, на разных участках скорость врезания и аккумуляции одинакова, и река транспортирует все поступающие в нее наносы. Его называют также выровненным. Такой профиль имеет вогнутую форму.

По Н.И. Маккавееву выработанный продольный профиль отличает стадию развития русла с установившимися определенными соотношениями между уклонами и транспортирующей способностью потока. Он формируется в процессе выравнивания транспортирующей способности потока по длине при относительно стабильных климатических и тектонических условиях. В сущности, принцип Э. Лейна описывает именно процесс выравнивания транспортирующей способности потока при изменении факторов, входящих в формулу. У равнинных рек с выработанным продольным профилем произведение QI стремится к некоторой постоянной величине, одинаковой по длине реки от истока до устья, а признаком полного выравнивания транспортирующей способности служит постоянство скорости течения в половодье и мутности воды по длине речной системы [1]. Н.П. Матвеев [3] определяет выработанный профиль реки как зрелый профиль, когда сглажены все его неровности.

Методы исследования

Особенности продольного профиля реки установлены на основе анализа картографических материалов и данных гидрологических наблюдений, а также материалов исследований русловых процессов, выполненных на отдельных участках реки в

2011–2015 гг. с учетом полученных ранее данных. Распределение уклонов получено по отметкам уреза воды, обозначенным на топографических картах издания 1960-х гг. Они были соотнесены с данными гидрологических постов для этого периода и соответствуют меженному уровню 80–90%-ной обеспеченности. Данные исследований последних лет, включавших съемку, промеры русла и однодневные связи уровня, приводились к единому (проектному) уровню воды, также соответствующему указанным статистическим характеристикам. На основе данных наблюдений на гидрологических постах Оки (от Орла до Горбатова) получен ряд зависимостей, необходимых для анализа продольного профиля. Так, увеличение площади бассейна по длине происходит по зависимости: $F = 2.3L^{1.6}$, где L – длина реки от истока в км. Также была установлена зависимость изменения среднего максимального расхода воды по длине реки: $Q = 117L^{0.61}$. Эта зависимость позволяет вычислить расход в нужных пунктах. Принято, что уклон, полученный по картам, мало меняется при высоких уровнях. Учитывая это, установлена зависимость уклона от среднего максимального расхода воды, аналогичная полученной Н.И. Макавеевым (1) при допущении, что выравнивание транспортирующей способности приводит к выравниванию скорости течения при руслоформирующем расходе воды. Для Оки она записывается: $I = 0.021Q^{-0.67}$. Для анализа неровностей продольного профиля применен так называемый индекс уклона, предложенный Дж. Хаком [4]. Индекс уклона (ИУ) рассчитывается по зависимости: $IY = \Delta H / \Delta L * L_n$, где ΔH – разница высот соседних пунктов, ΔL – расстояние между ними, L_n – накопленная длина от начала профиля. Индекс уклона для всей реки вычисляется по формуле: $IY_{\text{общ}} = \Delta H_o / \ln L_o$, где H_o – падение реки от истока до устья, L_o – длина реки. Аномальные пункты выявляются по величине отношения $IY / IY_{\text{общ}} > 2$.

Продольный профиль реки Оки

Русло реки формируется в ходе взаимодействия стока воды и стока наносов, которое зависит от строения и формы долины реки, а также уклона местности. Важную роль в формировании русла играют максимальные расходы воды, при которых переносится большая часть руслообразующих наносов. Средние максимальные расходы воды обычно наблюдаются при уровнях, соответствующих отметке бровки поймы. Площадь бассейна Оки составляет 245 000 км², длина реки 1500 км. Объем стока воды в устье составляет 38 км³, причем 70% стока проходит в период половодья.

По особенностям строения долина Оки очень разнообразна. В современном виде окская речная система сложилась в послеледниковое время, хотя река и притоки используют древние врезы, ныне заполненные более молодыми отложениями.

Можно выделить несколько участков реки, различающихся по морфологии, строению и истории развития (рис. 1). Верхняя часть бассейна реки лежит в пределах Среднерусской возвышенности, которая испытывала длительное постепенное поднятие. Ее равнинная волнистая поверхность расчленена глубоко врезанными долинами рек. В строении возвышенности участвуют известняки девона и карбона. До впадения р. Угры река пересекает северный склон возвышенности, глубина вреза долины увеличивается вниз по течению. Ширина долины редко превышает 1 км, высота крутых склонов, нередко сложенных коренными известняками, достигает 65 м. По берегам встречаются также моренные суглинки днепровского оледенения. Средний уклон реки на этом участке составляет 0.28‰. Русло представляет собой чередование вынужденных и свободных излучин с прямолинейными участками разной длины. В речных наносах преобладает песчано-гравийно-галечный и крупнообломочный материал. Местами встречаются валуны и обломки разной крупности, оставленные окским оледенением в долине реки.

После впадения Угры долина реки резко поворачивает на восток, однако ее характер практически не меняется, более того, между Калугой и Алексиным находится самый узкий участок долины – Алексинский каньон, где высота крутых склонов достигает 90 м [5]. Ширина поймы здесь не превышает 300 м. Ниже Алексина долина несколько

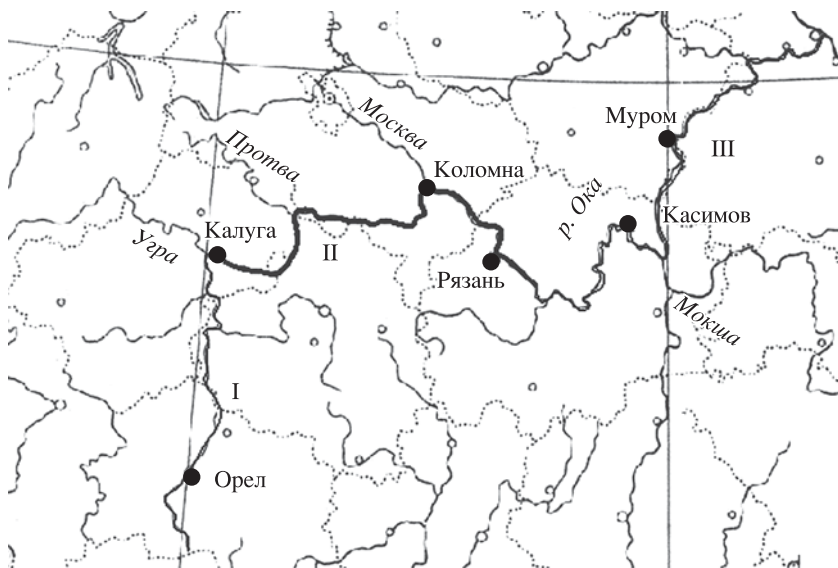


Рис. 1. Схема реки Оки. Римскими цифрами обозначены выделенные участки

расширяется, однако ее характер и строение сохраняются до впадения р. Осетр (Коломна). Здесь река протекает вдоль склона Среднерусской возвышенности, рассекая ее отроги. На участке между г. Алексиным (1035 км от устья) и устьем р. Протвы (987 км) в основании берегов выходят известняки. Коренные породы часто слагают основание правого берега, на левом – местами развиты аллювиальные террасы и встречается перебитая морена. Ширина долины неравномерна и колеблется от 0,4 до 3 км. Пойма обычно односторонняя шириной в несколько сотен метров; ее высота 5–8 м и более. Ширина русла в среднем равна 200–250 м и достигает 400 м в устье р. Москвы. Руслообразующие наносы представлены крупнозернистыми песками с примесью гравия крупностью 0,7–1,0 мм. Часто пески подстилаются глинами. Русло реки в основном прямолинейное, неразветвленное или образует пологие вынужденные излучины. Коэффициент извилистости составляет от 1,25 до 1,5. Этот участок, по крайней мере, со второй половины XX в. подвержен интенсивной антропогенной нагрузке – механическому изменению русла.

Начиная от Коломны, река протекает по Окско-Донской низменности, северная часть которой – Мещерская низменность – является водно-ледниковой и аллювиальной равниной. Это область продолжительное время отличалась тенденцией к относительному прогибанию, здесь отложился мощный слой песков и суглинков. Долина реки расширяется до 20–30 км. Пойма высотой 4–5 м очень широкая, изрезана ложбинами и протоками. Русло реки преимущественно свободно меандрирующее, наносы представлены песчаным материалом. Коэффициент извилистости русла составляет в среднем 1,8–1,87, однако есть и более извилистые участки, где он достигает 4. На фоне низменности выделяется Окско-Цнинский вал (плато), который река пересекает в районе г. Касимова (406 км), где ее долина образует крутые повороты, здесь обнажаются известняки и доломиты карбона. Ширина русла составляет у Кузьминского гидроузла 200 м, у Мурома – 350 м, у Нижнего Новгорода – 500 м. Средний уклон на участке от Рязани до устья – 0,045‰.

Видно, что продольный профиль Оки формировался в сложных геолого-геоморфологических и климатических условиях. К этому следует добавить деятельность человека, наиболее активную в последнее столетие. Трансформация продольного профиля Оки в конце XIX – первой половине XX в. отмечена в работе Н.И. Маккавеева [1],

который показал, что в верхнем течении реки от Орла до Калуги в этот период происходила аккумуляция наносов, обусловленная ускоренной эрозией почв в бассейне. Она выразилась в повышении меженных уровней со скоростью до 1 см/год. В то же время в среднем и нижнем течении от Калуги до Каширы меженные уровни настолько же понижались, что могло быть связано с медленным врезанием.

Продольный профиль Оки в целом от истока до устья характеризуется достаточно плавными очертаниями и значительной степенью вогнутости, типичными для рек с увеличивающимся к устью расходом воды. Кривая профиля описывается логарифмической зависимостью: $H = 261.5 - 25.6 \ln L$. Сглаженность профиля объясняется тем, что точки с отметками уреза воды расположены достаточно редко (в среднем через 13 км), и многие неровности профиля не отражаются. Точка наибольшего врезания находится на расстоянии 120–150 км от истока, что характеризует значительное эрозионное расчленение верховьев бассейна и определяется большим слоем зимних осадков и высокой интенсивностью стока.

Построенный по зависимости $I = 0.021Q^{-0.67}$ профиль водной поверхности, приведенный к отметкам уровней, характерным для межи, хорошо совпал с профилем, построенным по отметкам уреза, снятым с топографических карт. Наибольшие отклонения наблюдаются на участке от истока до впадения Угры, хотя некоторые присущи и другим участкам, но в масштабе всей реки они невелики. К выводу, что продольный профиль Оки является выработанным, приходит Н.П. Матвеев [3], основываясь на расчетах по собственному методу.

Представляет интерес распределение мощности потока ($E = \rho g Q I$, ρ – плотность воды) по длине реки. Учитывая, что плотность воды и ускорение свободного падения постоянны, мощность можно заменить произведением расхода воды (среднемаксимального) на уклон. На рис. 2 видно, что распределение мощности потока достаточно неравномерно, хотя и выдержано по длине реки. Средняя величина произведения QI для всей реки составляет 0.4. Главные пики приурочены к самым верховьям (от истока до Орла), участкам Калуга – Рязань и Касимов – Муром. В первом случае это связано с чередованием плесов с трудноразмываемыми перекатами, образованными выходами скальных пород и скоплениями крупных обломков. На втором участке колебания мощности, по-видимому, связаны с антропогенными нарушениями русла. На третьем участке река на фоне низменного рельефа пересекает Окско-Цнинский вал (Касимов), что обусловило местный рост мощности потока.

Более детально анализ продольного профиля можно выполнить по отдельным участкам, различающимся по условиям формирования русла. Так как гидрологические условия примерно одинаковы по длине реки, то главные различия заключаются

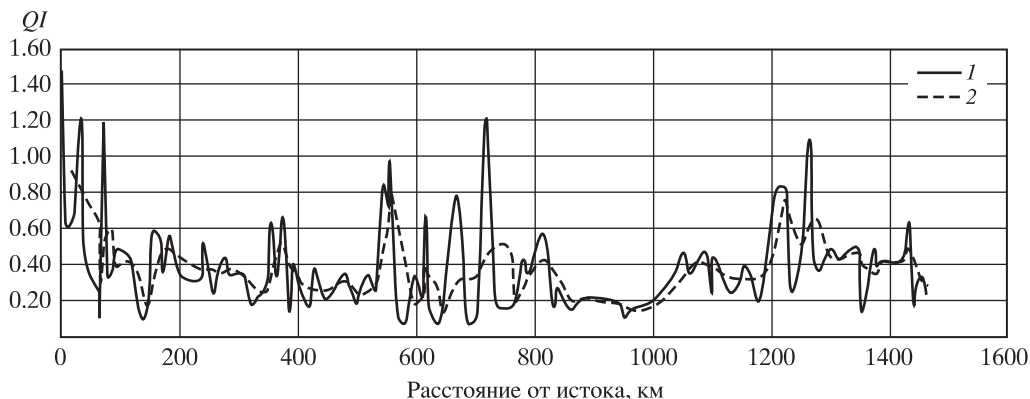


Рис. 2. Распределение мощности потока по длине р. Оки при максимальных расходах воды
1 – значения произведения QI , 2 – линейная фильтрация с параметром 3

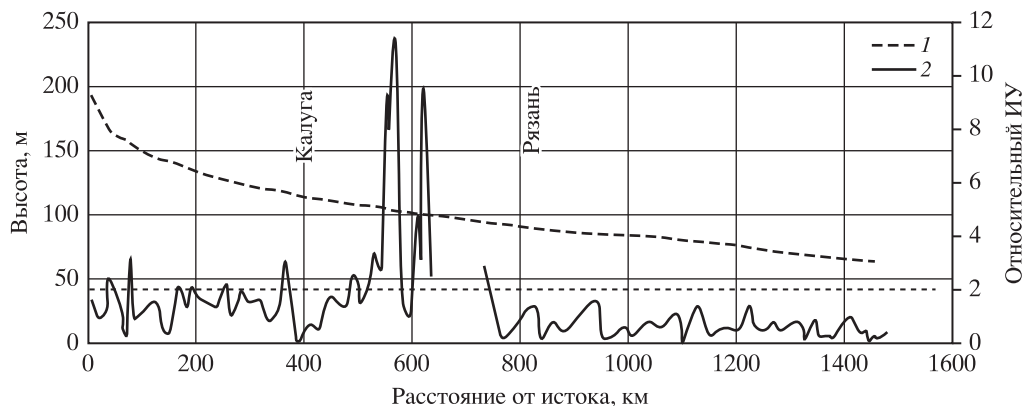


Рис. 3. Продольный профиль и распределение индекса уклона по длине реки
1 – продольный профиль, 2 – относительный ИУ (отношение частного индекса к общему)

в геоморфологии долины и степени антропогенных нарушений. В целом можно выделить три участка реки, которые различаются по морфологии и истории развития: исток – впадение р. Угры, Калуга – Коломна, Кузьминский гидроузел – устье (участок Коломна – Кузьминский гидроузел исключен, так как находится в подпоре низконапорных плотин). При этом, второй из этих участков, а также верхняя часть третьего участка в последние 60 лет подвержены интенсивному механическому нарушению в ходе массовой разработки русловых карьеров. Вычисление индекса уклона показало, что аномальные точки приурочены в основном к участку Калуга – Коломна (рис. 3). Аномальная зона относительного индекса протягивается практически от Алексина до устья р. Осетр с максимумом индекса в районе Каширы.

Участок р. Оки от Калуги до Коломны

Продольный профиль водной поверхности на участке имеет практически прямолинейную форму, это обусловлено тем, что максимальный прогиб общего профиля Оки расположен близко к ее истоку. Средний уклон водной поверхности равен 0.061‰, тогда как на участке от истока до впадения Угры он вчетверо больше. Причины и размеры трансформации продольного профиля реки рассматривались нами ранее [6]. Она выразилась в быстром снижении меженных (минимальных за период открытого русла) уровней воды на всех гидрологических постах: Калуга, Щукино (Алексин), Серпухов, Кашира. Причиной понижения уровней стало увеличение объема меженного русла за счет разработки русловых карьеров и связанной с ними глубинной эрозии. Объем добычи к началу 1990-х гг. достиг 55–60 млн м³ (около 250 тыс. м³ на 1 км русла). По самым приблизительным подсчетам эта величина составляет 75% объема естественного русла в межень. За последние 10–12 лет минимальные уровни воды в Серпухове и Кашире понизились на 0.5–0.6 м, а общее понижение уровней в этих пунктах с начала XX в. достигло 2.5 м.

Объем удаленного в ходе добычи аллювиального материала уже в начале 1990-х гг. соответствовал примерно 90-летнему объему стока взвешенных наносов Оки. Следует учитывать, что из русла удалялись крупные наносы песчано-гравийного состава, которых в составе взвешенных содержится не более 30% (в половодье). Восполнение этих наносов, если бы и было возможным в современных условиях, заняло бы не менее 200–300 лет. Большие объемы добычи привели к существенному изменению морфометрических характеристик русла. Прежде всего, за счет разработки подводных выемок глубиной до 10 м и более (карьеров) увеличилась средняя глубина русла. Так, с 1950 по 1992 г. средняя глубина на участке возросла почти в два раза,

Понижение отметок дна р. Оки

Участок, км от устья	Понижение отметки дна (м) за период, годы	
	1937–1991	1991–2014
Калуга – Серпухов, 1100–970	1.90	1.55
Серпухов – Коломна, 970–850	2.13	1.45

причем это произошло за счет понижения отметки дна реки, которое в среднем по участку превысило 2.0 м, а в последующий период (таблица) по приблизительным подсчетам – 1.5 м.

С начала 1990-х гг. интенсивность добычи резко снизилась, однако до сих пор составляет немалую величину – 200–300 тыс. м³ в год, – сопоставимую с объемом стока влекомых наносов. Понижение отметок дна продолжилось, хотя местами скорость его сократилась. Увеличение глубины, в соответствии с законами гидравлики, приводит к уменьшению уклона; однако в условиях рек с русловыми карьерами уменьшение среднего уклона сопровождается увеличением дифференциации этого показателя вдоль по долине. На участках отработанных карьеров, которые имеют протяженность от нескольких сотен метров до 10 км, уклон уменьшается в межень практически до нулевых значений. Вместе с тем карьеры разделяются между собой нетронутыми, как правило, перекатными участками, сложенными крупными наносами, на которых уклон увеличивается тем значительнее, чем больше понижение дна в карьере. В подобных местах меженная глубина уменьшилась, так как размыва, адекватного понижению уровня, не происходит. Выделяется несколько таких участков: выше Тарусы, Серпухова, Каширы и выше устья р. Осетра, на которых меженный уклон составляет 0.14–0.20‰. Таким образом, возникла и усугубилась ступенчатость продольного профиля дна, которая отразилась и в форме кривой водной поверхности.

Обсуждение результатов

Распределение уклонов по длине реки непосредственно зависит от процесса выравнивания транспортирующей способности потока. Ступенчатость продольного профиля в естественных условиях связана, главным образом, с впадением притоков и сменой горных пород. Интенсивное антропогенное вмешательство на рассматриваемом участке нарушило развитие процесса выравнивания транспортирующей способности потока.

На рис. 4 представлены сопоставленные продольные профили водной поверхности, иллюстрирующие основные черты распределения уклонов. Выработанный профиль – часть общего профиля – построен по зависимости (1) с приведением к уровням и расходам межи. Обращают на себя внимание два факта: 1) расчетный выработанный профиль параллелен профилю, построенному по отметкам бровки поймы, хотя последние получены по данным гидрологических постов (их всего 5) и имеют приблизительное значение и, кроме того, связаны с шириной дна долины; 2) расчетный профиль близко совпадает с профилем, полученным по нивелировке, выполненной в 1937 г. Их различает степень неровности, что вполне понятно, поскольку нивелировка производилась с гораздо большей детальностью. Так как добыча аллювия наиболее активно развивалась с начала 1950-х гг., то можно полагать, что в первой половине XX в. продольный профиль Оки на этом участке был еще в естественном состоянии, близком к выработанному. Связка уровня, выполненная в 1991–1992 гг. после 40-летнего периода интенсивного нарушения русла, показала, что водная поверхность на фоне неравномерного распределения уклонов опустилась существенно ниже выработанного профиля. Нивелировки водной поверхности, проведенные в 2012–2015 гг. на отдельных участках, подтвердили увеличение неравномерности распределения уклонов и отсутствие восстановления профиля. Представление о возможном низком положении водной поверхности в межень дает кривая, построенная по минимальным уровням 2015 г. на гидрологических постах.

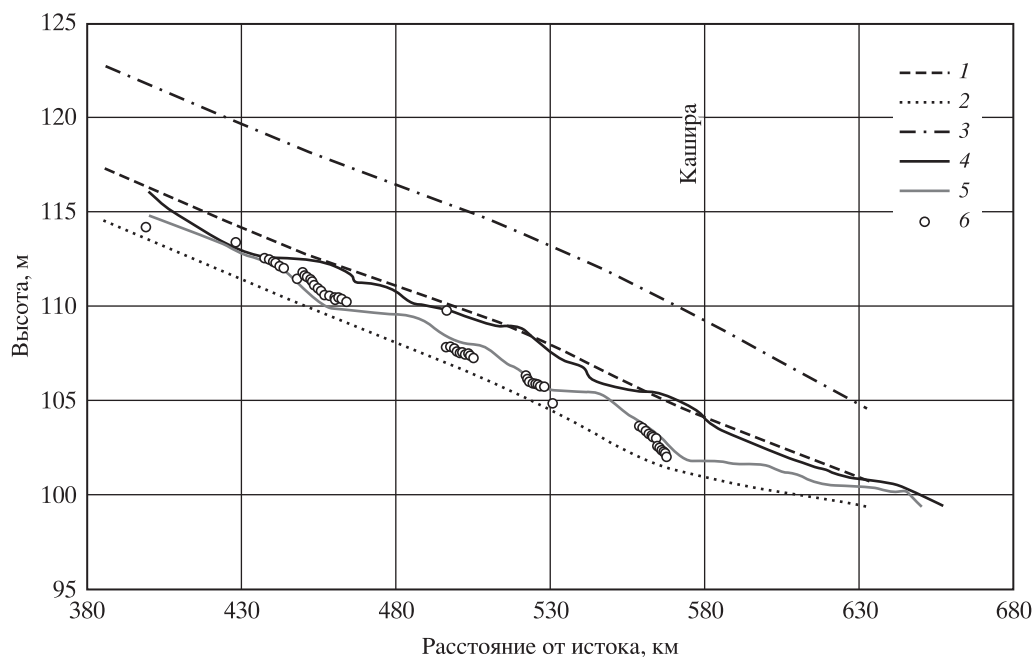


Рис. 4. Совмещенные продольные профили Оки на участке Калуга – Коломна

1 – расчетный, соответствующий выработанному; 2 – по минимальным уровням 2015 г; 3 – уровень бровки поймы; 4 – по связи 1937 г; 5 – по связи 1992 г; 6 – отметки уровня по связкам 2012–2015 гг.

Выводы

Продольный профиль р. Оки в целом достаточно близок по форме к выработанному, хотя, как показывает распределение мощности потока при расходах половодья, полного выравнивания транспортирующей способности не наблюдается.

Выделяются три участка реки, различающиеся по геоморфологическим условиям формирования продольного профиля. Они также отличаются по степени неравномерности распределения уклонов водной поверхности. Наибольшая неравномерность распределения этого показателя отмечается на участке между Калугой и Коломной, который в последние 60 лет подвергся интенсивному механическому преобразованию.

На этом участке реки еще в конце 1930-х гг. продольный профиль в главных чертах практически совпадал с расчетным выработанным профилем. Однако разработка русловых карьеров аллювиальных материалов и сопровождающая ее глубинная эрозия привели к тому, что резко выросла неравномерность распределения уклонов. Она сохраняется и даже усугубляется, несмотря на сокращение объемов добычи аллювия в конце XX – начале XXI вв. Последние данные показывают, что восстановления русла и, соответственно, водной поверхности не происходит. В результате трудности в использовании ресурсов реки, которые возникли в начале 1990-х гг., только увеличились. Ухудшились условия судоходства, затруднилась эксплуатация водозаборных сооружений и подводных переходов трубопроводов, река теряет рекреационное значение.

Благодарность. Работа выполнена в рамках ГБ темы НИР “Эволюция и трансформация эрозионно-русловых систем в условиях изменения природной среды и антропогенных нагрузок” и гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ-1010.2014.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
2. Lane E.W. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering // Proceedings, American Society of Civil Engineers. 1955. Vol. 81. P. 745.
3. Матвеев Н.П. Продольный профиль реки Оки // Электронный журнал “Вестн. Московского государственного областного ун-та. География”. 2010. № 1. С. 6–12
4. Hack J.T. Stream-profile analysis and stream-gradient index // Journal Research of United States Geological Survey. 1973. Vol. 1. P. 421–429.
5. Жидков М.П., Маккавеев А.Н., Макаренко А.Г. Некоторые черты рельефа и происхождение Алексинского каньона на реке Оке // Вопр. археологии, истории, культуры и природы Верхнего Поочья. Калуга: Полиграф-Информ, 2005. С. 288–291.
6. Беркович К.М. Современная трансформация продольного профиля верхней Оки // Геоморфология. 1993. № 3. С. 43–49.

Поступила в редакцию 09.02.2016

THE FEATURES OF THE OKA RIVER LONGITUDINAL PROFILE DEVELOPMENT UNDER THE ANTHROPOGENIC DISTURBANCES OF THE RIVER BED

K.M. BERKOVITCH, L.V. ZLOTINA, L.A. TURKIN

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia
e-mail: berkovitch@yandex.ru*

Summary

Based on the analysis of cartographic documents and hydrological data, as well as detailed studies of fluvial processes in the Upper Oka, carried out in 1990-ies and continued in 2010–2015, it was found that the longitudinal profile of the river was significantly influenced by anthropogenic river bed disturbances – exploitation of in-stream mines of alluvial construction materials, concentrated in the middle reaches of the river within 400–800 km from the source. Changes in river bed morphology and sediment deficiency has resulted in the deep erosion. To determine the role of anthropogenic disturbance in the longitudinal profile formation, in accordance with the N.I. Makkaveyev's approach, the calculation of graded longitudinal profile and its comparison with real one were performed. By calculating the stream-gradient index proposed by J. Hack, the uneven gradient distribution was revealed along the entire river and on separate typical sections. The highest values of the stream-gradient index observed at the site where mechanical modifications are the most – between Kaluga and Kolomna Cities. On this stretch of the river in the late 1930s, the longitudinal profile in most aspects practically coincides with the calculated graded profile. However, mechanical changes of the river bed and the accompanying river bed degradation has led to the fact that along with general elevation decrease, profile became ungraded, and one can expect some deformations aimed at its restoration. As a result, the difficulties in using the resources of the river, which emerged in the early 1990-ies, have increased.

Keywords: fluvial processes, longitudinal profile of river, anthropogenic disturbances.

doi:10.15356/0435-4281-2016-3-11