УДК 551.435.13

DOI: 10.18384/2712-7621-2020-3-27-46

ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ШИРИНЫ РУСЛА Р. ОКА (НА ПРИМЕРЕ РЯЗАНСКОГО УЧАСТКА ЕЁ ПОЙМЫ)

Воробьев А. Ю.

*Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина,
390000, г. Рязань, ул. Свободы, д. 46, Российская Федерация*

Аннотация.

Цель. Выявить факторы, воздействующие на изменчивость ширины русла Оки в пределах Рязанского расширения её поймы.

Процедура и методы. Осуществлено определение ширины русла Оки с помощью дистанционных и полевых методов. На камеральном этапе предложены аппроксимации установленных эмпирических значений, выполненные в программах STATISTICA 10.0, Microsoft Excel.

Результаты. Для Рязанского расширения поймы реки Оки в её среднем течении установлено расположение наиболее широких и узких участков окского русла. Определена его средняя по километровой ширине (B_p) в пределах участка 743–662 км от устья с учётом локальной изменчивости русловой морфодинамики. Установлено, что значимым фактором, влияющим на изменчивость B_p , являлась смена морфодинамического типа русла с много рукавного на меандрирующий, к чему оказалась чувствительна аппроксимация с помощью метода наименьших взвешенных квадратов.

Теоретическая и практическая значимость. Предложены статистические аппроксимации полученных значений данного морфологического параметра. Минимумы ширины русла соответствуют нетипичным в геолого-геоморфологическом плане участкам поймы, что должно учитываться в будущих прогнозах развития русловых деформаций в пойме средней Оки.

Ключевые слова: пойма, полином, р. Ока, ширина русла, Атлас Менде, меандрирование, аппроксимация, ГИС

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект № 18-45-623002) и Министерства промышленности и экономического развития Рязанской области.

GEOLOGICAL AND GEOGRAPHICAL FACTORS AND REGULARITIES OF THE VARIABILITY OF THE OKA RIVER WIDTH (BY THE EXAMPLE OF THE RYAZAN EXTENSION OF ITS FLOODPLAIN)

A. Vorobyov

*Ryazan State University named for S. Yesenin
46 ul. Svobody, 390000 Ryazan, Russian Federation*

Abstract.

Aim. The paper identifies geological, geomorphological and hydromorphological factors affecting the variability of the width of the Oka within the Ryazan extension of its floodplain.

Methodology. The width of the Oka is determined using remote and field methods. At the cameral stage, we approximated established empirical values in STATISTICA 10.0 and MS Excel programs.

Results. The location of the widest and narrowest sections of the Oka river is found for the Ryazan expansion of the Oka floodplain in its middle course. An average width (B_p) of each individual kilometer of the river is determined within a section of 743–662 km from the mouth, taking into account the local variability of the river morphodynamics. It is found that a significant factor, affecting the variability of B_p is the change in the morphodynamic type of the riverbed from anabranching to meandering. It is revealed that the approximation using the least weighted squares method turns out to be the most sensitive to the changes in river morphology.

Research implications. Geological, geomorphological and hydromorphological factors affecting the B_p variability are analyzed. Statistical approximations of the obtained values of the morphological parameter are proposed. The minima of the riverbed width are found to correspond to floodplain areas that are atypical in geological and geomorphological terms, which should be taken into account in future forecasts of the development of riverbed deformations in the floodplain of the middle section of the Oka river basin.

Keywords: floodplain, polynomial, Oka river, width of the riverbed, Mende's Atlas, meandering, approximation, GIS

Acknowledgments. This work was performed in the Ryazan State University named for S. Yesenin and supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 18-45-623002).

Введение

Ширина русла реки в межень (B_p) – один из наиболее просто определяемых её параметров. Являясь функцией ряда переменных (расхода воды, порядка реки, устойчивости русла, уклона и других), ширина руслового ложа в пойменных бровках позволяет оценить степень компактности потока, его удельную мощность, установить множество корреляционных зависимостей [1, с. 89; 22, с. 34; 26, с. 458; 33, с. 337]. Зачастую, она заметно варьирует даже на непродолжительных отрезках русел равнинных рек с постоянными уклонами, протекающих в относительно однородных по составу отложениях. Морфодинамический тип русла (по классификации Р. С. Чалова) оказывает значительное влияние на локаль-

ные значения величины B_p [3, с. 65; 22, с. 84]. При прочих равных условиях, относительно прямолинейное русло на коротких отрезках сохраняет близкие значения ширины, тогда как меандрирующий поток, на фоне чередования зон размыва и аккумуляции, тяготеет к смене русловых расширений сужениями. Анализ параметров многорукавного русла предполагает подсчёт величины B_p в сечении суммарно для всех рукавов, результатом чего является, как правило, увеличение ширины русла в пойменных и русловых разветвлениях.

Известно [22, с. 35], что ширина русла реки с ростом увлажнённости бассейна растёт быстрее глубины и потому является параметром, более чувствительным к естественным и антропогенно инспирированным из-

менениям ландшафтов водосбора. Хозяйственная деятельность человека может приводить как к изменению соотношения подземного и поверхностного стока, так и к общему увеличению твёрдого стока [21, с. 318; 26, с. 240]. Последнее способствует увеличению мутности рек, заилению прирусловых участков их пойм, а рост доли подземного стока, обусловленный антропогенным нарушением естественной структуры почв, снижает максимальные расходы весенних половодий. Активная аккумуляция потоком взвешенных наносов на фоне снижения интенсивности горизонтальных русловых деформаций ведёт к уменьшению ширины речных русел. Краевые их зоны (затоны, заводи) и второстепенные рукава заносятся илом, накопление которого (в случае его химического загрязнения) может резко повышать экологические риски [1, с. 161; 32, с. 1329] на локальном уровне.

В Рязанском расширении поймы р. Оки на современном этапе русловой поток в основном меандрирует, образуя излучины, различные по динамике развития и морфологическим параметрам [3, с. 65; 11, с. 143]. Значительно реже на данном участке река Ока имеет относительно прямолинейное русло, для которого лишь в незначительной степени отмечается искривление динамической оси потока (рис. 1). В то же время, за последние столетия плановые контуры Оки постоянно изменялись, активизация русловых деформаций была вызвана, в том числе, с естественными и антропогенно обусловленными изменениями ландшафтов окского бассейна. Так, с начала XVIII в. до начала XX в., на фоне изменения структуры

землепользования в окском бассейне, доля площади лесов в центральных губерниях Европейской России уменьшилась с 45% до 30%, а в Центрально-Чернозёмных – с 24% до 10% [15, с. 84]. Одновременно с этим происходил рост площади пашни, пастбищ и сенокосов, что способствовало увеличению жидкого и твёрдого стока и поставке дополнительных объёмов наносов на поверхность поймы средней Оки.

Известно, что пары и пашни при небольшой шероховатости поверхности способствуют особенно интенсивному плоскостному смыву, в том числе и во время снеготаяния [21, с. 401]. Благоприятное сочетание природных (суровые зимы с последующей дружной весной) и антропогенных факторов (сведение лесов и интенсивная распашка при существенном росте населения) соответствовало периоду гидрологических наблюдений 1878–1932 гг. на средней Оке. Прохождению мощных половодий, фиксировавшихся на данном этапе, соответствовали высокие значения максимальных расходов (до 14000–15000 м³/с под Рязанью в 1908 году). В ряде случаев [16, с. 57] это приводило к формированию новых рукавов Оки и протоков, спрямляющих русло. С внедрением в 1930-е гг. зяблевой вспашки полей [9, с. 607] на реках Центральной России улучшились фильтрационные качества почв, что способствовало увеличению доли подземного стока и снижению скорости добегания воды в гидрографической сети окского бассейна.

Во второй половине XX в. и в начале XXI в. для центральных областей Европейской России отмечается [8, с. 344] увеличение испарения и уменьшение объёма стока, в том числе по

Рис. 1. / Fig. 1. Картограмма района исследований / Map of the area under study

Источник: данные автора

причине увеличения залесённости данной территории. Рост площади залежных земель и лесных угодий накладывался в отдельные годы на проявления отрицательных температурных аномалий зимне-весеннего периода (1970 г., 1994 г., 1999 г.), приводивших к мощным половодьям [16, с. 69], но общий вековой тренд на снижение значений максимальных уровней и руслоформирующих расходов оставался неизменным. Соответственно, усиливались тенденции к консервации береговых откосов при увеличении шероховатости пойменной поверхности в целом (зарастание древесно-кустарниковой растительностью). Примером литологического отклика пойменной морфолитосистемы средней Оки на

данные процессы можно считать постепенное измельчение состава свежих аллювиальных осадков, что наблюдалось ещё в 1960-е гг. [14, с. 130] и фиксируется в 2010-е гг. [13, с. 36].

Современные значения V_p Оки на рассматриваемом участке, таким образом, фактически наследуются от периода высоких половодий и сведения лесов на большей части бассейна Оки в верхнем и среднем течении. На последовавшем за ним этапе уменьшения стока и интенсивности хозяйственного использования бассейновых угодий рекой осуществлялось в основном поддержание ширины руслового ложа. Осложнение его плановых очертаний происходило на местном уровне за счёт эрозионно-аккумулятивных про-

цессов, обусловленных гидродинамическими особенностями потока.

Ранее для Рязанского расширения окской поймы давались общие оценки изменчивости B_p , с выделением основных факторов, вызывающих её локальные флуктуации [3, с. 66; 10, с. 180; 13, с. 32]. Разнообразие значений параметров окских излучин и чередование их с участками относительно прямолинейного русла обуславливает необходимость получения данных высокого разрешения о пространственной изменчивости B_p . Повышенная продолжительность суженных либо расширенных отрезков русла Оки элементарного масштаба на конкретных пойменных выделах заставляет искать эволюционные причины выявленных закономерностей. Подтверждённые результатами статистической обработки фактического материала, наиболее значимые локальные отклонения значений B_p от средних значений соответствуют участкам поймы, развитие которых отражает местные тенденции развития рельефа.

Район и методика исследований

Рязанское расширение входит в число чередующихся расширенных и суженных участков днища окской долины, которая имеет чётковидную форму в средней части речного бассейна. Русло реки на большей части района исследований врезано в четвертичные отложения, мощность которых достигает 20 м [12, с. 192]. Они представлены песками, супесями и суглинками, залегающими на известняках каменноугольного возраста, реже на глинах и алевроитах средней юры. На участке 696–691 км от устья русловое ложе непосредственно врезано в кров-

лю известняков, формируя цокольную пойму. В пределах современного пояса меандрирования повсеместно распространены русловая и пойменная фации аллювия. Мощность последней на участке русла 708–703 км достигает 6–6,5 м, в пределах большинства пойменных генераций – 2–4 м. В соответствии с разделением рек, принятым в ведущих зарубежных школах русловедения, по составу донных отложений р. Ока принадлежит к рекам с песчаным дном (sand rivers) [25, с. 198; 26, с. 400; 30, с. 760].

С точки зрения классификации пойм по энергии рельефообразования окская пойма в Рязанском расширении может быть отнесена к подклассу В3 – среднеэнергетические поймы с зависимостью локального рельефообразования от текстуры и состава аллювиальных осадков [30, с. 467].

В Рязанском расширении поймы р. Оки, на отрезке 743–662 км от её устья, ширина русла изменяется в широких пределах – от 120 м до 370 м, в среднем – 214 м (рис. 1). В период паводков на уровне нижнего интервала руслоформирующих расходов на участках русловых разветвлений B_p может превышать 450 м. Соотношение ширины поймы к ширине русла на участке 742–735 км составляет около 20/1, на участке 741–720 км – около 37/1. Южнее, в наиболее расширенной части поймы, соотношение B_n/B_p достигает 70/1, снижаясь на участке 678–672 км до 11/1. Русло Оки в пределах района исследований преимущественно меандрирует, образуя излучины, различные по форме и параметрам. Они разделены непродолжительными «вставками» относительно прямолинейного русла на участках 743–736 км, 725–718 км,

680–674 км, с отчётливо выделяющимися палеоизлучинами и старицами на примыкающих пойменных массивах.

Как известно, проявления флювиального рельефообразования носят в основном дискретный характер, в связи с этим пойменные морфосистемы континуальных долинных ландшафтов дифференцируют в ходе анализа на отдельные элементы [7, с. 141; 26, с. 305]. Весь 81-километровый отрезок русла реки был разделён на километровые участки, в каждом из которых по 20 поперечникам была определена средняя ширина Оки в летнюю межень. Измерения производились по спутниковым снимкам 2010-го, 2016-го и 2018-го гг. и по топографическим картам 1979 г., 1989 г. и 2001 г. В ряде мест, для которых имелись спутниковые и топографические данные были, на наш взгляд, неполны и неточны, ширина водотока устанавливалась в полевых условиях с помощью лазерного дальномера BushnellScout. Различия между полевыми и спутниковыми данными выражены, главным образом, для вершин излучин Оки и связаны с уровнем реки во время спутниковой съёмки. Наибольшие искажения для вершин меандров определяются возможным подтоплением русловых отмелей. Средняя разница между измерениями B_p , сделанными с помощью дальномера при уровне реки с нулевым превышением над меженным урезом и спутниковыми снимками, полученными в летнее время, не превышает 3–5%. Для «весенних» снимков расхождения с меженной шириной могут достигать 10–20%.

Статистическая обработка полученных 1620 значений B_p производилась в программах STATISTICA 10.0 и Microsoft Excel. Для грубой аппроксима-

ции линейного тренда были применены логарифмическая функция (десятичный логарифм) и полином третьего порядка. Локальные экстремумы получены с помощью полинома пятого порядка и метода наименьших взвешенных квадратов (WLS). Произведено параметрическое сравнение диаграмм размаха значений линейного тренда x_i и совокупностей значений отклонений от него $y^f(x)$, полученных при аппроксимации упомянутыми функциями. Картосхемы района исследований подготовлены в программе ГИС «Панорама» 11. Для анализа переформирований окского русла на отдельных участках использовались соответствующие топографические материалы от 1792 г. (карта Рязанского наместничества), 1850 г. (карта Рязанской губернии Атласа Менде), 1941 г. (карта РККА) и топокарта 2001 г. масштаба 1:25000. Графическая обработка рисунков осуществлялась в программе CorelDRAWx7.

Полученные результаты и их анализ

Общие закономерности изменения B_p на участках с меандрирующим руслом, установленные для Рязанского расширения р. Оки, типичны для большинства равнинных рек. Чередование зон размыва и аккумуляции при меандрировании определяет изменение B_p в соответствии с расположением макроформ руслового рельефа. На перекатных участках русло расширяется, поток расплывается, его бурность (число Фруда) увеличивается. Обратная ситуация наблюдается в пределах плёсов, хотя иногда, при наличии у выпуклого берега обширной отмели, общая ширина русла может быть увеличенной, особенно при его

Рис. 2. / Fig. 2. Минимумы и максимумы ширины русла р. Оки на отрезке 743–662 км от её устья и аппроксимации множества значений данного параметра / Minima and maxima of the width of the Oka riverbed at the interval of 743–662 km from its mouth and approximation of the set of values of this parameter

Источник: данные автора

заполнении на уровне нижнего интервала руслоформирующих расходов [18, с. 70; 19, с. 176; 22, с. 60; 28, с. 1495]. Наиболее характерным примером сужения потока при увеличении его глубины является участок русла Оки в 729–726 км от её устья. Он соответствует излучине с местным названием «Бараньи рожки» и примыкающей к ней выше по течению Костинской излучины (участок № 7 на рис. 2). На вершине излучины «Бараньи рожки»

река осуществляет интенсивную глубинную эрозию, здесь обычны глубины 9–12 м [17, с. 15].

Ширина компактного потока на участке русла 729–726 км не превышает 15–20 максимальных значений его глубины, ширина надводной части прирусловых отмелей – наибольшая в Рязанском расширении. Гидродинамические особенности движения водных масс на повороте создают условия для поддержания

Фото 3 / Photo 3. Аэрофотоснимок поймы и русла реки Оки на вершине Канищевской излучины. 1 – песчаные отложения, в которые врезано русло / Aerial photograph of the floodplain and bed of the Oka River at the top of the riverbend “Kanishchevskaya”. 1 – sandy deposits into which the river is cut

Источник: фото автора

малой ширины потока при высоких скоростях аккумуляции на выпуклом берегу и постоянной боковой эрозии вогнутого берега [5, с. 154]. Значения V_p здесь не превышают 190 м. Однако при наличии прирусловой отмели шириной до 80 м на вершине излучины в средние по высоте половодья русло расширяется до 230–250 м.

К русловым сужениям также относятся участки № 8–11 (рис. 1). На участке № 8 река Ока испытывает сопротивление высокого (7–8 м) берегового откоса, сложенного связными алеврито-илистыми грунтами. Он соответствует нижнему крылу Коростовской излучины, подрезающей массив наложенной поймы, пойменная фация аллювия в пределах которой залегает на отложениях размытой надпойменной террасы. В голоценовую эпоху данный участок был вовлечён в пойменный режим, что предопределило местный размыв в ходе боковой эрозии, замедлившийся в последние десятилетия.

Горизонтальные русловые деформации также, по-видимому, затухают и на участке № 9, соответствующем Канищевской и Заокской излучинам. На вершине Канищевской излучины (708 км от устья) русло Оки врезается в песчаные отложения останца надпойменной террасы, водно-ледниковые разнозернистые пески вскрываются на обоих берегах данного синусоидального меандра (фото 3).

Относительная устойчивость берегов русла в пределах отмеченных участков фиксируется также и на отрезках № 4, № 10, № 11. В пределах последнего, при несовпадении скорости смещения выпуклого и вогнутого берега Дубровичской излучины, средние значения V_p уменьшаются до 150–170 м. При блуждании динамической оси потока крутыми являются оба берега, прирусловые отмели и побочни здесь не выражены, а русло врезано в связные илистые отложения, хорошо сопротивляющиеся раз-

Фото 4 / Photo 4. Аэрофотоснимок Канищевского оврага, сделанный Люфтваффе, июль 1941 г. 1 – овраг с распаханным водосбором, 2 – конус его выноса в русле рукава Оки «Трубезж» / Aerial photograph of the ravine “Kanishchevsky”, made by the Luftwaffe in July 1941: 1 – a ravine with a plowed catchment area, 2 – a cone of its removal in the bed of the Oka’s “Trubezh” branch

Источник: фото автора

мыву. Продолжительные минимумы значений B_p на графике, также, по-видимому, связанные с устойчивостью пойменных отложений, и, как следствие, являющиеся отражением устойчивости самого русла, принадлежат также участкам 709–704 км и 696–694 км.

В границах последнего из них (участок № 10) отмечаются наименьшие значения B_p во всём Рязанском расширении. Здесь, в пределах цокольной поймы, русло р. Оки врезано в кровлю известняков каменноугольного возраста, что предполагает повышение устойчивости русла и затрудняет его эрозионную деятельность (фото 4–6). Местные значения средней скорости потока увеличены, дно выстлано перлювиальными осадками размыва, смешанными с русловыми песками [10,

с. 82]. На верхнем крыле Лесопарковой излучины врезанное русло Оки сужается до 110–130 м, оба берега крутые, глубины достигают 6–7 м. Следует отметить, что увеличение B_p русла до 190–220 м на участке ниже по течению, в привершинной части Лесопарковой излучины, связано с заложением здесь карьера для добычи русловых песков, отделившего вершину меандра самостоятельной протокой [10, с.136, 11, с. 149].

Следует отметить, что не только вершина Лесопарковой излучины, но и большая часть исследованного участка русла была местом добычи русловых отложений [4, с. 31]. При этом на участках 743–700 км и 700–680 км от устья во второй половине XX в. преобладала эрозия (как антропогенный, так и естественный тренды). Участок

Фото 5. / Photo 5. Аэрофотоснимок русла и поймы Оки в Рязанском расширении (сделан автором). 1 – суженный участок № 10 русла Оки на цокольной пойме, 2 – расширение русла Оки на вершине Луковской излучины (участок № 3) / Aerial photograph of the bed and floodplain of the Oka in the Ryazan extension (made by the author). 1 – narrowed section No. 10 of the Oka on the basement floodplain, 2 – widening of the Oka bed at the top of the riverbend “Lukovskaya” (section No. 3)

Источник: фото автора

680–642 км отличался преобладанием аккумулятивных тенденций, несмотря на активную добычу русловых песков. Интенсивность горизонтальных русловых деформаций, определённая теми же авторами за период 1939–2003 гг., была наибольшей на участках 740–700 км и 680–642 км [4, с. 31]. Относительной стабильностью отличалось русло Оки на отрезке 700–680 км.

При более дробном делении русла Оки, на фоне отсутствия русловых карьеров, при эксплуатации которых были бы затронуты береговые откосы, обнаруживается существенная локальная изменчивость параметра B_p . На севере Рязанского расширения, на

Новосельских перекатах (742–740 км от устья, участок № 1), русло Оки побочневого типа с тенденцией к аккумуляции у правого коренного борта долины и к формированию грядовых макроформ. Здесь для функционирования паромной переправы периодически осуществляется обновление глубины фарватера на теле побочня. До 250–260 м увеличиваются значения B_p на перекаате Нижний Дядьковский (участок № 5). Поток распластывается и у с. Коростово, на участке около устья р. Вожи, где B_p достигает 270–280 м (участок № 2). Местное расширение русла Оки, в отличие от участка № 1, сопровождается поддержанием глубин

Фото 6. / Photo 6. Фотоснимок окского русла на участке № 10. Хорошо видна отмостка из известняковой гальки и глыб / Photograph of the Oka riverbed at section No. 10.

A blind area of limestone pebbles and boulders is clearly visible

Источник: фото автора

порядка 4–7 м. Близкие глубины, при B_p меньшей на 15–20%, характерны и для привершинной части Луковской излучины (участок № 3). Крутой меандр с $r/h=0,55$, но с округлой вершиной, поддерживает фронт размыва длиной 4,1 км, при относительной выровненности (по нашим данным) динамики прирусловой аккумуляции по длине выпуклого берега [13, с. 35]. Русловые разветвления на участках 690 км (№ 4) и 673 км (№ 6), с разделением русла Оки на главный и побочный рукава, увеличивают ширину р. Оки до 250–320 м. У оголовков островов, создающих разветвления, глубины уменьшаются до 1,5–2,5 м, в вертикально сжатом потоке сток делится по рукавам и формируются осерёдки.

Ширину русла реки Оки в Рязанском расширении можно представить в виде статистической выборки с целью оптимального представления скры-

тых закономерностей варьирования параметра B_p (рис. 2). Множество его отдельных покилометровых значений (x_i) в программе STATISTICA 10.0 было аппроксимировано с помощью следующих функций:

1. Логарифмической, на основании десятичного логарифма (зависимость 1) для отображения главного тренда:

$$f(x) = 220,1589 - 4,08131gx \quad (1)$$

2. Полинома 3-го порядка (зависимость 2) с целью определения основных экстремумов;

$$\deg 3f(x) = 0,0000533x^3 + 0,0029x^2 + 0,6377x - 223,9391 \quad (2)$$

3. Полинома 5-го порядка (зависимость 3), отображающего локальные экстремумы меньшего масштаба:

$$\deg 5f(x) = 0,224832x^5 + 0,0003x^4 + 0,0205x^3 + 0,6691x^2 \quad (3)$$

Также проведено описание эмпирических значений исследованного па-

метра посредством метода наименьших взвешенных квадратов (WLS). Для отображения локальных экстремумов параметру густоты пиков присвоено значение 0,2.

Аппроксимация логарифмической функцией значений ширины окского русла установила общее снижение B_p на протяжении Рязанского расширения. Если на входе в него поток имеет усреднённую ширину в пойменных бровках около 220 м, то на выходе из расширения, на участке поймы между с. Казарь и с. Глебово среднее значение B_p падает до 210 м (рис. 2). При описании значений B_p полиномом 3-го порядка выяснилось, что экстремум значений функции соответствует участку 703–695 км русла Оки. Однако на соответствующем русловом отрезке расстояние между пойменными бровками изменяется в широких пределах от 130 м до 250 м, не являясь постоянно близким к минимальным значениям. Смысл описания значений посредством данной функции состоит в выделении главного отрицательного экстремума [2, с. 204; 20, с. 55]. В приходящейся на него части множества значений B_p , должны фиксироваться относительные минимумы как положительных, так и отрицательных значений ряда x_i . В границах определённого экстремума (участка 709–695 км от устья) большинство максимальных значений B_p не превышает 225 м, лишь на вершине Луковской излучины р. Ока расширяется до 250 м, минимуму функции соответствует участок № 10 с наименьшими значениями B_p во всём Рязанском расширении. По данной причине график функции прогибается на участке «верхнее крыло Луковской излучины – верхнее крыло Лесопарковой излучины».

Полином 5-ой степени хорошо описывает изменчивость максимальных значений B_p . Положительные его экстремумы соответствуют участкам № 1–2 и № 5–6 (перекаты у с. Новосёлки Рыбновского района, с. Дядьково и с. Льгово), отрицательные – участкам № 7, № 10–11 с некоторым сдвигом. При этом затухиваются минимумы B_p на нижних крыльях Коростовской и Канищевской излучин (участки № 8–9) – они попадают в один из положительных экстремумов функции, хотя и на его спаде. Наиболее выраженный минимум полинома на участке русла 694–687 км соответствует различным значениям ширины потока, как близким к средним – 200–210 м, так и наибольшему в районе исследования – 317 м. Очевидно, что отрицательная кривизна графика в пределах данного минимума обусловлена наличием резко выраженных минимумов B_p на 695 км и 684 км. Степени полинома недостаточно для выделения положительных максимумов функции на участках 693–691 км и 703–700 км, и отрицательного – на участке 710–705 км.

Метод WLS, основанный на минимизации взвешенной суммы квадратов модели, оценивает значимость отдельных вариантов B_p . При этом определяется их значимость в соответствии с дисперсией случайной ошибки – наблюдения, далеко отстоящие от среднего, оцениваются как наименее значимые [2, с.119]. Аппроксимация с помощью WLS выявила явный минимум выровненного тренда на 706–694 км, соответствующий эмпирическим минимумам (участки № 9 и № 10) и максимуму (участок № 3) (рис. 2). Ещё один отрицательный экстремум ширины русла отмечается для излучины «Бараньи рожки», положительные – для

Рис. 7. / Fig. 7. Диаграммы размаха значений $B_p(xt)$ и множеств отклонений от xt , полученных при аппроксимациях различными функциями / Diagrams of the range of values of $B_p(xt)$ and the sets of deviations from xt obtained by approximations by various functions

Источник: данные автора

Новосельских перекаатов, участка русла у с. Коростово и отрезка 670–662 км на выходе из Рязанского расширения.

Сравнение диаграмм размаха линейного тренда и отклонений от выравненного $y^{\wedge}f(x)$, проведенное для каждой из функций, позволяет с уверенностью говорить об описании одной и той же выборки в исследовании (рис. 7). Наименьшие значения среднего отклонения и стандартной ошибки ожидаемо соответствуют логарифмической функции, наибольшие – тренду WLS и $deg5f(x)$.

Совпадение полиномиального тренда и тренда WLS на уменьшение B_p в границах участка 709–695 км предполагает поиск причин выявленной закономерности. Отмеченный отрезок русла содержит два минимума (участки

№ 9 и № 10) и один максимум линейного тренда – участок № 3, приходящий на вершину Луковской излучины. Анализируя карту Рязанского наместничества 1792 г. издания [24], легко заметить, что на данном участке в то время существовало несколько рукавов Оки (рис. 8). Несмотря на значительные искажения, допущенные при составлении данной карты, можно идентифицировать второстепенный рукав «Трубеж», примыкавший к современным микрорайонам Канищево, Ворошиловка и Солнечный. Ещё одно второстепенное русло Оки продолжалось от с. Коростово через оз. Жидень до с. Шумашь, соединяясь с главным руслом Оки через старицу Маринка. Как известно [18, с. 38; 22, с.

Рис. 8. / Fig. 8. Рукава р. Оки на картах Рязанского расширения, изданных в 1792 г. и в 1941 г. (по [24]) / Anabranh of the Oka on Ryazan expansion maps published in 1792 and in 1941 [24]

Источник: [24]

159; 29, с. 253], многорукавное русло формируется при способности потока поддерживать несколько рукавов, что свидетельствует о повышенной водности (у рек с расходом $<30 \text{ м}^3/\text{с}$ разветвлённое русло практически не встречается). Конец XVIII в. – первая половина XIX в. соответствует последнему пессимуму Малого Ледникового периода (минимум Дальтона) [6, с. 43; 27, с. 209], который отличался суровыми зимами, мощными половодьями и резким повышением вероятности заложения новых рукавов Оки.

Распределение расходов воды по нескольким рукавам в XIX в. на участке 703–697 км от устья создавало условия для замедления русловых деформаций на Луковской излучине. На карте Атласа Менде 1860 г. издания она имеет П-образную форму, а не сегментную, как в настоящее время (рис. 9). Переход между подобными формами меандров,

как правило, связан с увеличением водности реки, активизацией русловых деформаций и приданием изгибу потока закруглённой формы [23, с. 261; 25, с. 103; 29, с. 252]. На карте РККА 1941 г. издания вторичные рукава Оки («Трубеж» и Коростовско-Шумахский) уже неактивны (рис. 5). Переброска их расходов в главное русло повлекла увеличение живой силы потока на закруглении, что предопределило преобразование Луковской излучины в русловой изгиб со значительно более пологими контурами, чем ранее.

Расширение Оки на участке 703–697 км связано, таким образом, с заилением второстепенных рукавов реки. Отмирание второстепенного рукава «Трубеж», по всей видимости, вызвано активизацией выноса материала из Канищевского оврага при распахке его водосбора (рис. 4). На аэрофотографии 1941 г. хорошо заметен конус выноса главного оврага, перекрывший

Рис. 9. / Fig. 9. Наложение контуров русла р. Оки на участке 721–691 км от устья с карты Атласа Менде на современное положение водотока / Overlaying of the contours of the Oka riverbed at 721–691 km from the mouth from Mende's Atlas map to the current position of the watercourse

Источник: данные автора

рукав «Трубеж», идентифицируются многочисленные мелкие овраги, осложняющие склоны, при полностью распаханном водосборе. Заилиение ещё менее полноводного Коростовско-Шумашского рукава, по-видимому, являлось следствием повышенной мутности полых вод из-за увеличения твёрдого стока в окском бассейне в конце XIX – начале XX вв. У западной окраины Шумашского останца скорость полноводного потока уменьшалась, и взвешенные наносы выпадали, заноса узкое ложе малого рукава Оки. Отметим, что район Рязанского расширения как раз соответствует [21, с. 470] границе зон средней мутности рек по Г. В. Лопатину (переход

из зоны 50–150 г/м³ в зону 20–50 г/м³). Помимо оседания транзитного взвешенного материала, некоторую роль в отмирании Коростовско-Шумашского рукава мог также играть постоянный перегон скота с нарушением почвенного покрова примыкающих участков поймы.

Распознавание относительной молодости расширения р. Оки на участке 703–697 км от устья с помощью функций WLS и $deg3f(x)$ основано на большей стабильности смежных участков русла (709–704 км и 696–694 км). Между тем проявление местных особенностей циркуляции потока может приводить к стабильности значений B_p при нестабильности самого русла. Так,

современный минимум V_p на участке № 8 соответствует нижнему крылу Коростовской излучины, плановые очертания которого претерпели наибольшие изменения. Этот элемент меандра сохранил низкие значения ширины русла при горизонтальных русловых деформациях за более чем 150-летний период. Преобладание влияния местных либо бассейновых факторов на варьирование ширины руслового ложа устанавливается, таким образом, при сопряжённом применении статистических, геоинформационных, геоморфологических и исторических методов в исследованиях динамики ландшафтов поймы средней Оки.

Заключение

Ширина русла в Рязанском расширении поймы реки Оки в её среднем течении, изменяясь в пределах 120–370 м, в целом соответствует известным представлениям об изменчивости данного параметра в меандрирующем русле. На перекатных участках и в пределах русловых разветвлений местные значения V_p превышают среднее значение (214 м) на 10–15%, реже на 25–35%. Местам врезания р. Оки в известняки московского яруса, участкам с повышенной устойчивостью берегов, а также отрезкам русла с активной глубинной эрозией соответствует уменьшение значений V_p на 25–50% относительно средней величины. Описание эмпирических данных V_p с помощью логарифмической функции установило падение значений данного показателя в Рязанском расширении с 220 м до 210 м по течению Оки. При аппроксимации значений V_p полиномом третьей степени и методом наименьших взвешенных квадратов выявлен локальный отрицательный

экстремум, приходящийся на привершинную часть Луковской излучины. При анализе исторических карт данной области было установлено отмирание малых второстепенных рукавов р. Оки в начале XX в. и переброска их расходов в главное окское русло. По-видимому, одной из причин заиления малых рукавов Оки было увеличение твёрдого стока из-за роста распаханности междуречий окского бассейна в условиях перенаселённости сельской местности в его пределах. В связи с этим, ещё до начала добычи русловых песков на средней Оке, на этапе интенсивного хозяйственного освоения её бассейна при участившихся мощных половодьях, произошло изменение формы Луковского меандра, приведшее к превращению его из П-образного изгиба в сегментную излучину, а позднее – в излучину омеговидной формы. Таким образом, применение статистической обработки множества километровых значений V_p в Рязанском расширении позволило выявить неочевидные морфологические результаты относительно недавних изменений морфодинамического типа русла р. Оки и местных проявлений его эрозионно-аккумулятивной деятельности. Морфометрический анализ плановых контуров русел рек, таким образом, может проводиться с использованием статистических методов. Его применение может быть особенно эффективным в условиях антропогенно освоенных регионов с повышенным твёрдым стоком и быстрым откликом системы «пойма-русло» на хозяйственное преобразование рельефа и ландшафтов речных бассейнов.

Статья поступила в редакцию 21.04.2020 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеевский Н. И. Формирование и движение речных наносов. М.: 1998. 202 с.
2. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 756 с.
3. Баровский Н. А., Чалов Р. С. Гидролого-морфологический анализ и деформации меандрирующих русел р. Оки и её притоков // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2004. № 2. С. 64–68.
4. Беркович К. М., Злотина Л. В., Турыкин Л. А. Природно-антропогенные деформации русла Оки в районе Рязани // Геоморфология. № 2. 2009. С. 26–32.
5. Воробьев А. Ю., Пузаков С. В. Динамика боковой эрозии на вогнутых берегах излучин реки Оки в её среднем течении в XIX–XX веках и на современном этапе // Вестник Рязанского государственного университета. 2017. № 3/56. С. 150–157.
6. Даценко Н. М., Сонечкин Д. М. Реконструкция синхронных вековых колебаний на западе и востоке Северного полушария за последние 2000 лет и их связь с солнечной активностью // Изв. РАН. Серия: География. 2009. № 4. С. 40–48.
7. Завадский А. С., Кораблева О. В., Чернов А. В. Проявления дискретности флювиальных рельефообразующих процессов // Материалы XXXV Пленума Геоморфологической комиссии РАН. 2016. С. 139–143.
8. Кашутина Е. А., Коронкевич Н. И. Влияние изменения состава лесов Европейской части России на годовой сток // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 4. С. 339–349.
9. Коронкевич Н. И., Барабанова Е. А., Георгиади А. Г., Долгов С. В., Зайцева И. С., Кашутина Е. А. Оценка антропогенных воздействий на водные ресурсы России // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 6. С. 603–614.
10. Кривцов В. А. Региональный геоморфологический анализ. Рязань, Издательство РГПИ, 1998. 195 с.
11. Кривцов В. А., Воробьев А. Ю. Особенности пространственной организации и формирования локальных морфологических комплексов в пределах поймы реки Оки на её рязанском участке // Вестник Рязанского государственного университета. 2014. №1/42. С. 141–154.
12. Кривцов В. А., Воробьев А. Ю., Комаров М. М. Река Ока и некоторые особенности развития рельефа южной части Мещерской низменности в четвертичное время // Вестник Рязанского государственного университета им. С. А. Есенина. № 2 (51). 2016. С. 181–197.
13. Кривцов В. А., Воробьев А. Ю., Пузаков С. В. Применение метода ковриков-ловушек для определения динамики накопления современного аллювия на рязанском участке среднего течения р. Оки // Вестник Волгоградского Государственного Университета, Серия 11: Естественные науки. 2015. №4 (14). С. 30–39.
14. Лазаренко А. А. Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны (на примере Днепра, Десны, Оки): монография // Труды ГИН. Вып. 120. М.: Наука, 1964. 236 с.
15. Люри Д. И., Горячкин С. В., Караваева Н. А., Денисенко Е. А., Нефедова Т. Г. Динамика сельскохозяйственных земель в России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
16. Маврин Л. Б., Воробьев А. Ю., Водорезов А. В., Чернов А. В., Рубцова Л. Ю., Бутко А. А. Ока: настоящее, прошлое и будущее: монография. Рязань, 2019. 86 с. .
17. Моспан Е. Л. Лоция внутренних водных путей. Москва: Транслит, 2008. 112 с.
18. Назаров Н. Н., Егоркина С. С. Реки Пермского Прикамья: Горизонтальные русловые деформации. Пермь: Звезда, 2004. 155 с.
19. Николаев И. В. Оценка затопляемости пойм больших рек во время половодья (на примере реки Оби) // География и природные ресурсы. 2012. № 4. С. 175–179.

20. Прасолов В. В. Многочлены. 3-е издание, исправленное. М.: МЦНМО, 2003. 336 с.
21. Соколовский Д. Л. Речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 527 с.
22. Чалов Р. С., Завадский А. С., Панин А. В. Речные излучины. М., 2004. 371 с.
23. Чернов А. В. География и геоэкологическое состояние русел и пойм рек северной Евразии. М.: Крона, 2009. 684 с.
24. Это Место – старые карты России и Мира онлайн [Электронный ресурс]. –URL: http://www.etomesto.ru/map-ryazan_1792/ (дата обращения: 15.08.2020).
25. Bridge J. S. Rivers and floodplains — forms, processes, and sedimentary record. Blackwell Publishing Company, Oxford, UK, 2003, 491 p.
26. Kondolf G. M., Piygay H. Tools in Fluvial Geomorphology: Chichester, John Wiley and Sons, 2003. 688 p.
27. Lamb H. H. Climate: Present, Past and Future. V. 2. L: Methuen Press, 1977. 531 p.
28. Makaske B., Lavooi E., Haas T., Kleinhans M. G. Derald, Smith G. Upstream control of river anastomosis by sediment overloading, upper Columbia River, British Columbia, Canada // *Sedimentology*, Vol. 64, 2017. P. 1488–1510
29. Martınez-Fern6ndez V., Gonz6lez delT6nago M., Garcıa de Jalyn D. Selecting geomorphic variables for automatic river segmentation: Trade-offs between information gained and effort required // *Geomorphology*, Vol. 329, 2019. P. 248–258.
30. Nanson G. C., Croke J. C. A genetic classification of floodpains // *Geomorphology*, Vol. 4, 1992, P. 459–486.
31. Phillips R. T. J., Desloges J. R. Alluvial floodplain classification by multivariate clustering and discriminant analysis for low-relief glacially conditioned river catchments // *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 40, 2014. P. 756–770.
32. Purvis R. A., Fox G. A. Streambank sediment loading rates at the watershed scale and the benefit of riparian protection // *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 41, 2016. P. 1327–1336.
33. Zhang L., Zhang H., Tang H., Zhao C. Particle size distribution of bed materials in the sandy river bed of alluvial rivers // *International Journal of Sediment Research*, Vol. 32, 2017. P. 331–339.

REFERENCES

1. Alekseevskii N. I. *Formirovanie i dvizhenie rechnyh nanosov* [Formation and movement of river sediments]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1998. 202 p.
2. Anderson T. *Statisticheskii analiz vremennyh ryadov* [Statistical Time Series Analysis]. Moscow: World, 1976. 756 p.
3. Barovsky N. A., Chalov R. S. [Hydrological and morphological analysis and deformation of meandering channels of the Oka river and its tributaries] // In: *Bulletin of the Moscow State University*. Ser. 5. Geography, 2004, no. 2, pp. 64–68.
4. Berkovich K. M., Zlotina L. V., Turykin L. A. [Natural and anthropogenic deformations of the Oka riverbed in the Ryazan region] In: *Geomorphology*, 2009, no. 2, pp. 26–32.
5. Vorobyov A.Yu., Puzakov S. V. [Dynamics of lateral erosion on the concave banks of the bends of the Oka River in its middle course in the XIX–XX centuries and at the present stage] In: *Bulletin of the Ryazan State University*, 2017, no. 3, pp. 150–157.
6. Datsenko N. M., Sonechkin D. M. [Reconstruction of synchronous secular oscillations in the west and east of the Northern Hemisphere over the past 2000 years and their relationship with solar activity] In: *Izv. RAS, Ser. Geography*, 2009, no. 4, p. 40–48.
7. Zavadsky A. S., Korableva O. V., Chernov A. V. [Manifestations of discreteness of fluvial relief-forming processes] In: *Materials of XXXV Plenum of the Geomorphological Commission*

- of the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 139–143.
8. Kashutina EA, Koronkevich N. I. [Effect of changes in forest composition in the European part of Russia on annual runoff] In: *Water Resources*, 2013, v. 40, no. 4, pp. 339–349.
  9. Koronkevich N. I., Barabanova E. A., Georgiadi A. G., Dolgov S. V., Zaitseva I. S., Kashutina E. A. [Assessment of anthropogenic impacts on water resources of Russia] In: *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2019, V. 89, no. 6, pp. 603–614.
  10. Krivtsov V. A. *Regional'nyi geomorfologicheskii analiz* [Regional geomorphological analysis]. Publishing House, Ryazan, 1998. 195 p.
  11. Krivtsov V. A., Vorobev A.Yu. [Features of the spatial organization and formation of local morphological complexes within the floodplain of the Oka River on its Ryazan site] In: *Bulletin of the Ryazan State University*, 2014, no. 1, pp. 141–154.
  12. Krivtsov V. A., Vorobyov A.Yu., Komarov M. M. [The Oka River and some features of the development of the relief of the southern part of the Meshchera lowland during Quaternary] In: *Bulletin of the Ryazan State University named for S. Yesenin*, 2016, no. 2 (51), pp. 181–197.
  13. Krivtsov V. A., Vorobyov A.Yu., Puzakov S. V. [Application of the sedimentary trap method for determining the dynamics of accumulation of modern alluvium in the Ryazan section of the middle reaches of the Oka river] In: *Bulletin of the Volgograd State University*, Ser. 11 Natural Sciences, 2015, Vol. 4, Iss. 4, pp. 30–39.
  14. Lazarenko A. A. *Litologiya allyuviya ravninnykh rek gumidnoi zony (na primere Dnepra, Desny, Oki)* [Lithology of alluvium of the lowland rivers of the humid zone (on the example of the Dnieper, Desna, Oka)]. Monograph // Transactions of the GIN, vol. 120. M.: Nauka, 1964. 236 p.
  15. Luri D. I., Goryachkin S. V., Karavaeva N. A., Denisenko E. A., Nefedova T. G. *Dinamika sel'skohozyaistvennykh zemel' v Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* [The dynamics of agricultural land in Russia in the twentieth century and post-agrogenic restoration of vegetation and soil]. M., GEOS, 2010. 416 p.
  16. Mavrin L. B., Vorobyov A. Yu., Vodorezov A. V., Chernov A. V., Rubtsova L. Yu., Butko A. A. *Oka: nastoyashchee, proshloe i budushchee* [Oka: present, past and future]. Monograph. Ryaz. State Univ. S. Yesenin. Ryazan, 2019. 86 p.
  17. Mospan E. L. *Lotsiya vnutrennih vodnykh putei* [Inland waterway], Moscow: Translit, 2008. 112 p.
  18. Nazarov N. N., Egorkina S. S. *Reki Permskogo Prikam'ya: Gorizonta'nye ruslovye deformatsii* [Rivers of Perm Prikamye: Horizontal channel deformations]. Perm: Star, 2004. 155 p.
  19. Nikolaev I. V. [Assessment of floodability of floodplains of large rivers during floods (for example, the Ob River)]. *Geography and Natural Resources*, No. 4, 2012. P. 175–179.
  20. Prasolov V. V. *Polinomy* [Polynomials]. 3 rev. Moscow, MCCNMO, 2003. 336 p.
  21. Sokolovsky D. L. *Rechnoi stok* [River flow]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1959. 527 p.
  22. Chalov R. S., Zavadsky A. S., Panin A. V. *Rechnye izluchiny* [River bends]. Moscow, Publishing House, 2004. 371 p.
  23. Chernov A. V. *Geografiya i geoekologicheskoe sostoyanie rusel i poim rek severnoi Evrazii* [Geography and geoecological state of beds and floodplains of rivers of northern Eurasia]. Moscow, Krona, 2009. 684 p.
  24. EtoMesto – old maps of Russia and the World online [Electronic resource]. – URL: http://www.etomesto.ru/map-ryazan_1792/ (date of access: 15.08.2020).
  25. Bridge J. S. *Rivers and floodplains — forms, processes, and sedimentary record*. Blackwell Publishing Company, Oxford, UK, 2003, 491 p.
  26. Kondolf G. M., Piégay H. *Tools in Fluvial Geomorphology*: Chichester, John Wiley and Sons, 2003. 688 p.
  27. Lamb H. H. *Climate: Present, Past and Future*. V. 2. L: Methuen Press, 1977. 531 p.

28. Makaske B., Lavooi E., Haas T., Kleinhans M. G. Derald, Smith G. Upstream control of river anastomosis by sediment overloading, upper Columbia River, British Columbia, Canada In: *Sedimentology*, Vol. 64, 2017. P. 1488–1510
29. Martínez-Fernández V., González delTàngo M., García de Jalyn D. Selecting geomorphic variables for automatic river segmentation: Trade-offs between information gained and effort required In: *Geomorphology*, Vol. 329, 2019. P. 248–258.
30. Nanson G. C., Croke J. C. A genetic classification of floodpains In: *Geomorphology*, Vol. 4, 1992, P. 459–486.
31. Phillips R. T. J., Desloges J. R. Alluvial floodplain classification by multivariate clustering and discriminant analysis for low-relief glacially conditioned river catchments In: *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 40, 2014. P. 756–770.
32. Purvis R. A., Fox G. A. Streambank sediment loading rates at the watershed scale and the benefit of riparian protection In: *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 41, 2016. P. 1327–1336.
33. Zhang L., Zhang H., Tang H., Zhao C. Particle size distribution of bed materials in the sandy river bed of alluvial rivers In: *International Journal of Sediment Research*, Vol. 32, 2017. P. 331–339.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Воробьев Алексей Юрьевич – кандидат географических наук, старший преподаватель кафедры географии, экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина»;
e-mail: a.vorobyov90@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Aleksey Y. Vorobyov – Cand. Sci. (Geography), Assistant, Department of Geography, Ecology and Nature Management, Ryazan State University named for S. Yesenin;
e-mail: a.vorobyov90@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Воробьев А. Ю. Геолого-географические факторы и закономерности изменчивости ширины русла р. Ока (на примере рязанского участка её поймы) // Географическая среда и живые системы. 2020. № 3. С. 27–46.
DOI: 10.18384/2712-7621-2020-3-27-46

FOR CITATION

Vorobyov A. Yu. Geological and geographical factors and regularities of the variability of the Oka river width (by the example of the Ryazan extension of its floodplain). In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2020, no. 3, pp. 27–46.
DOI: 10.18384/2712-7621-2020-3-27-46