

Г.В. Лобанов, О.А. Зройчикова, А.В. Полякова, Е.А. Сабайда, М.А. Новикова, Б.В. Тришкин

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ФЛЮВИАЛЬНЫХ СИСТЕМ В БАССЕЙНЕ ВЕРХНЕГО ДНЕПРА

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта «Современные географические процессы Сибири: динамика, закономерности развития и экологические аспекты» (соглашение № 14.В37.21.2025 от 14.11.2012 г.) в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Рассмотрены методологические проблемы оценки геолого-геоморфологического строения территории как фактора развития флювиальных систем для отдельных форм русла, пойменно-русловых комплексов, гидрологических систем малых порядков в бассейне верхнего Днепра. Обоснована целесообразность специфического описания геолого-геоморфологических факторов в зависимости от уровня организации флювиальной системы. Подтверждена значимость учёта динамики смежных форм в объяснении особенностей пространственной структуры флювиального рельефа.

Ключевые слова: флювиальные системы; вероятностная динамика; прочностные свойства руслоформирующих грунтов; пространственная структура пойменно-русловых комплексов; гидрологические сети.

Методологические проблемы оценки геолого-геоморфологического фактора динамики флювиальных систем

Морфология и пространственная структура флювиальных форм разного порядка отражают особенности гидрологических и геолого-геоморфологических условий их развития. Непосредственные сведения о скорости и направлении флювиальных и, прежде всего, руслоформирующих процессов за небольшой интервал времени имеются для малого количества отрезков течения. Перенос полученных закономерностей даже на смежные участки русла, прогноз и ретроспективный анализ ситуации представляются неоднозначно решаемой задачей. Реперными наблюдениями на равнинных реках в разных географических условиях установлена асинхронная динамика смежных русловых форм. Обоснованное распространение получил подход к оценке параметров русловых процессов через подобие факторов их проявления. Наиболее сложной и неоднозначно оцениваемой группой факторов представляются геолого-геоморфологические особенности территории, отличающиеся высокой пространственной неоднородностью.

Действие фактора оценивается пространственным распределением неустойчивых флювиальных форм или их участков, конфигурация которых изменяется во времени и пространстве. Подход является реализацией пороговой концепции, широко распространённой в географических и геоэкологических исследованиях. Предполагается теоретическое и эмпирическое обоснование критического значения некоторого базового показателя, разделяющего интервал возможных значений на области устойчивости и неустойчивости флювиальной формы. Базовый показатель для форм руслового рельефа выражается гидрологическими характеристиками водотока, прочностными свойствами грунта, их соотношением, выраженным через комплексный коэффициент (или критерий). Гидрологические характеристики выражаются непосредственно – через критическую скорость размыва, величину руслоформирующего расхода или косвенно – уклоном по руслу. В последнем

случае – если гидрограф объекта отсутствует или ряд наблюдений не представляет его наиболее отклоняющиеся от среднего значения показатели. Варианты моделей, построенных на гидрологических показателях, представлены в работах М.А. Великанова, В.Н. Гончарова, Ц.Е. Мирцхулава [1, 2].

Прочностные свойства (устойчивость к размыву) оцениваются параметрами частиц руслоформирующих грунтов или инженерно-геологической характеристикой их некоторого массива. Размер частицы широко используется в моделях флювиальных процессов, но в действительности имеет ограниченные области обоснованного применения – несвязные грунты и ровная поверхность ложа водотока. Исследования границ применения таких моделей ведутся начиная с классических работ по оценке устойчивости речных русел. Модели учитывают, кроме среднего диаметра частиц, падение по руслу [3], уклон и глубину русла [4], придонную скорость [5]. Более поздние модели учитывают сочетания тех же факторов в нелинейной форме [5, 6 и др.].

Устойчивость к размыву связных грунтов (супесей, суглинков и глин) справедливо оценивать только для некоторого массива грунта, поскольку величина показателя зависит от угла внутреннего трения и сцепления. Прочностные характеристики массива оцениваются реакцией грунта на физическое воздействие в рамках моделей, допускающих разную степень подобия реальным условиям взаимодействия поток – русло. Наибольшим подобием обладают физические модели в лотках, которые воспроизводят как инженерно-геологические характеристики руслоформирующих грунтов, так и шероховатость ложа водотока. Подтверждена хорошая сходимость модельных и реальных результатов для разных диапазонов прочности грунта и шероховатости ложа [7].

Оценка устойчивости размыву по методу аналогий выражается сопротивлением грунта разрушающему воздействию рабочей частью прибора для измерения прочности. Геометрическое и даже физическое подобие реальному взаимодействию поток – русло не предполагается. Метод имеет существенные физические допущения, в частности, воздействие на грунт направ-

лено перпендикулярно береговому уступу, что в реальных условиях является достаточно редким случаем, но его применение вполне обоснованно для оценки относительной устойчивости участков русла при прочих однородных условиях. Для нескальных грунтов воздействие оценивается давлением металлического конуса или размывающей струи (метод, предложенный Г.В. Бастраковым), поданной через насадку, на участок берегового уступа [8, 9].

Отличия динамики водотоков обосновывают региональную и локальную специфику значений показателей, разделяющих устойчивое и неустойчивое состояние русла [9, 10]. Соответствие характеристик флювиальной формы (или её части) неустойчивому состоянию в рамках модели неоднозначно определяет их изменения в пространстве и времени. Возможны случаи принципиального расхождения реальной и модельной динамики – расчётно нестабильный участок остаётся сравнительно устойчивым, обратная ситуация встречается реже [11]. Особенность, по-видимому, связана с принципом подбора ключевых участков, по которым тестируется модель, их размещают на размываемых, заведомо неустойчивых участках береговых уступов. Соседние отрезки течения с подобными геолого-геоморфологическими и гидрологическими условиями могут оставаться стабильными. Ситуация обосновывает использование вероятностной оценки устойчивости, при которой определяется количество случаев соответствия модельной скорости и / или направление морфологических изменений реальной ситуации в границах относительно однородных в отношении руслоформирующих факторов участков. Сочетание и вес значимых факторов отличаются в разных моделях. Дополнительно, кроме описанных выше гидрологических и геолого-геоморфологических условий, в моделях учитывается влияние береговой растительности, морфологии берегового уступа, существенное влияние обосновано в работе [12].

Принципиально важным направлением представляется разработка характеристик устойчивости русла в зависимости от иерархического уровня флювиальной формы. Использование иерархической системы показателей динамики экзогенного рельефа представлено в некоторых обзорных работах, но недостаточно широко реализовано для региональных флювиальных систем [13]. Отступление берегового уступа с некоторой принятой в рамках модели скоростью на локальном участке определяет его неустойчивое состояние, но для протяжённого участка русла не является обоснованной характеристикой такового. На уровне серий русловых форм, морфологически однородных участков русла характеристиками устойчивости являются соотношение направлений динамики отдельных форм, стабильность её направления во времени. На уровне гидрологических систем устойчивостью может характеризовать отклонения от классической эрозионной схемы развития, предполагающей последовательное соединение водотоков и стабильность гидрометрических соотношений, определённых по методу Хортон – Стралера [14, 15].

Устойчивость в рамках подхода выражается не столько изменением морфологических характеристик объекта, сколько стабильностью, прогнозируемостью

процесса. Комплекс методов оценки устойчивости специфичен для иерархических уровней. В изучении динамики отдельных форм русла используются реперные наблюдения, сопоставление космических снимков высокого разрешения и крупномасштабных топографических карт за короткие промежутки времени; для морфологически однородных отрезков течения – сопоставление разновременных геоизображений среднего масштаба; для гидрологических систем – морфологический анализ современных картографических материалов.

Влияние геолого-геоморфологических характеристик территории на особенности динамики флювиальных форм рассмотрено на примере левобережной части бассейна верхнего Днепра на уровне отдельных излучин меандрирующего русла, пойменно-русловых комплексов, гидрологических систем бассейнов малых порядков.

Геолого-геоморфологическая характеристика левобережья верхнего Днепра. Гидрологическая характеристика модельных объектов

Бассейн верхнего Днепра расположен в западной части Восточно-Европейской равнины. Территория характеризуется умеренно-континентальным климатом, относится к области избыточного и достаточного увлажнения (лесная зона). Средняя температура января изменяется от -8°C на юго-западе до -10°C на северо-востоке. Количество осадков изменяется в зависимости от мезоклиматических условий в интервале 500–600 мм, с колебаниями в отдельные годы от 400 до 950 мм. В геоморфологическом отношении территория представляет аллювиально-флювиогляциальную пологоволнистую равнину с преобладающими высотами 100–200 м. Поверхность равнины сложена преимущественно песчано-глинистыми аллювиальными и водно-ледниковыми отложениями и, в меньшей степени, глинистым (моренным) комплексом днепровского оледенения [16].

Левобережные притоки верхнего Днепра относятся к равнинным рекам с преобладанием меандрирующего морфодинамического типа русла. Свободным условиям развития горизонтальных деформаций способствует широкая пойма с относительной высотой 3–5 м, поверхность которой осложнена множеством стариц, грив и валов, нередко занята болотами. В долине наиболее крупной реки региона Десны ширина поймы достигает 4–6 км. Территория бассейна, расположенная на границе крупных природных регионов, отличается высоким геоморфологическим и ландшафтным разнообразием. Даже в границах бассейнов рек, по морфологическим признакам относящихся к малым, ландшафтная структура неоднородна, что имеет немаловажное значение в оценке условий и характеристик стока. Разнообразие ландшафтной структуры оценивалось нами на примере хорошо изученных притоков Десны – Снежети (длина 86 км, площадь бассейна $1\,250\text{ км}^2$) и Навли (длина 125 км, площадь бассейна $2\,242\text{ км}^2$). Снежеть пересекает от истока к устью 3 типа ландшафтов – эрозионные (24,3 км – 28,6% длины), предполесские (6,3 км – 7,4%) и полесские (54,3 км – 64%). Навля в верхнем

течении пересекает эрозионные ландшафты на 46 км (36,8% от общей длины течения), в среднем течении разграничивает эрозионные и предопольские ландшафты – на 29,2 км (23,36% длины), ниже – полесские и предполесские – на 24,6 км (19,68% длины); низовья реки расположены в полесских ландшафтах (25,2 км – 20,16% длины). Разнообразие ландшафтной структуры и связанных с ней особенностей хозяйственного освоения определяет неоднородность условий стока и разнообразие русловых процессов.

Модельные объекты изучения динамики излучин расположены в среднем течении р. Десна. По внутригодовому распределению река относится к восточно-европейскому типу, с высоким весенним половодьем, низкой зимней и летне-осенней меженью. Дождевые паводки накладываются на весеннее половодье и летне-осеннюю межень. Сток формируется талыми (50%), грунтовыми (30–35%), дождевыми водами (10–15%). Объём стока 95% обеспеченности составляет около 1,65 млрд м³/год, средний сток в многоводные годы составляет 3,5 км³/год, в маловодные – 2,3 км³. Среднемноголетний расход воды (гидропост Брянск) составляет 88,0 м³/с, коэффициент вариации его величины – 24%. Сток зарегулирован Десногорским (верхнее течение реки) и Людиновским (крупный левобережный приток Болва) водохранилищами.

Долина реки в среднем течении широкая (до 40 км), резко асимметричная, правый склон короткий, крутой; левый пологий террасированный, плавно переходит в водораздельную поверхность [17]. Долина врезана на 80 м по отношению к водораздельным поверхностям правобережья и на 140 м – по отношению к левобережному (западный макросклон Среднерусской возвышенности). Широкая пойма (до 5 км) определяет свободные условия горизонтальных деформаций русла. Интенсивное меандрирование и невысокие береговые уступы определяют сложную морфологическую структуру поймы – гривистый рельеф, обилие стариц, неширокое распространение ровных поверхностей центральной части, большую площадь заболоченных тыловых фрагментов. Прирусловая пойма – хорошо выраженная на многих участках течения слабоволнистая повышенная равнина, образованная системой прирусловых валов. На отдельных участках русло следует вдоль участков правого коренного склона, сложенного карбонатными породами верхнемелового возраста, или фрагментов первой надпойменной террасы поздневалдайского возраста, образованной аллювиальными песками. Преобладает меандрирующий тип русла (68% длины модельного участка) отрезка, на относительно прямолинейное и разветвлённое на рукава русло приходится по 16%.

Особенности морфологии и динамики форм меандрирующего русла

Особенности динамики излучин описаны скоростью продольных и поперечных деформаций, установленной реперными наблюдениями и сопоставлением разновременных крупномасштабных картографических материалов для 31 ключевого объекта. Изменение конфигурации определено за период с середины 80-х гг.

XX в. до середины первого десятилетия XXI в. Скорость поперечных деформаций оценивается изменением средней максимальной длины стрелы прогиба модельных излучин. Интенсивность продольных деформаций – изменением длины излучины по руслу. Поперечная скорость горизонтальных деформаций изменяется от 1,3 до 24 м/год; продольная – от 1,8 до 2,8 м/год [18, 19]. Наиболее активно преобразуются сегментные пологие и крутые излучины, что объясняется максимальной энергией потока на участках такой кривизны [20]. Петлеобразные, сундучные омеговидные излучины в среднем изменяются медленнее, но им принадлежат участки с наибольшей скоростью отступления берегового уступа – до 5,4 м/год. Для береговых уступов ключевых объектов определены инженерно-геологические характеристики руслоформирующих грунтов, в том числе сопротивление размыву (R). Использована методика размывающей струи:

$$R = N/Vp = N tp/lp,$$

где R – сопротивление размыву грунтов, H ; N – мощность струи на выходе из насадка, Вт; Vp – средняя скорость размыва, м/с; tp – время размыва, с; lp – глубина (длина) размыва, м [21].

Установлена и теоретически обоснована зависимость сопротивления размыву грунта с его механическим составом, концентрацией и формой гидроксидов железа, плотностью, величиной угла внутреннего трения, сцеплением и особенностями почвенно-растительного покрова поймы. Влияние прочностного сопротивления размыву на скорость горизонтальных деформаций оценивается особенностями распределения ключевых объектов со средней или выше средней интенсивностью отступления береговых уступов по классам сочетаний руслоформирующих факторов. По методике Стёрджесса ряд значений индекса устойчивости (K_u) разделён на 3 интервала:

$$K_u = R/Q_{срmax},$$

где R – сопротивление размыву руслоформирующих грунтов (H); $Q_{срmax}$ – среднемаксимальный расход воды, м³/с.

Первый интервал образуют участки с невысоким сопротивлением размыву (преимущественно песчаные грунты) и значительным среднемаксимальным расходом. Здесь русло переформируется со скоростью, близкой к среднему значению (2,0–3,0 м/год) или превосходящей его на 80% участков, составляющих класс. Относительно высокие темпы плановых переформирований русла обусловлены благоприятным сочетанием факторов – сравнительно низкая прочность руслоформирующих грунтов (R – в среднем 490 Н) при значительном расходе ($Q_{срmax}$ – до 865 м³/с). Минимальные значения индекса совпадают с максимальной скоростью отступления берегового уступа (до 4,0 м/год) – размываются высокие береговые уступы, сложенные песками целиком или у основания. Второй интервал образуют «типичные участки» со средними значениями скорости горизонтальных деформаций и параметров руслоформирующих факторов. Третий интервал представлен участками с очень высоким для некарбонатных грунтов сопротивлением размыву (R – в среднем 1750 Н), небольшим среднемаксимальным расходом ($Q_{срmax}$ – до 250 м³/с) и скоростью переформирований

русла менее 1,5 м/год. Относительно стабильные береговые уступы, кроме того, составляют существенную долю участков в первом и втором интервалах. Распределение отражает вероятностный характер проявления горизонтальных деформаций – отличия динамики при сходе руслоформирующих факторов. Характер зависимости определяют два существенных обстоятельства: влияние динамики соседних участков и границы применимости сопротивления грунтов размыву как фактора динамики флювиальных форм разного масштаба.

Расхождение модельной и реальной динамики русла под влиянием изменений на смежных и удалённых участках течения хорошо известно и подтверждено для разных объектов, в том числе Десны в среднем течении, но строгая модель процесса не разработана вследствие разнообразия возможных сочетаний форм русла, направлений и скорости их развития. Применение прочностных характеристик грунтов как фактора, изменениями которого за десятки – первые сотни лет можно пренебречь, обоснованно, если типичный период развития объекта меньше или сопоставим с интервалом времени, за который оцениваются его морфологические изменения. В ином случае сравниваются объекты разных порядков, с неодинаковой скоростью развития, оценка факторов процесса не является в полной мере достоверной. Существенно это проявляется на более высоких уровнях организации флювиального рельефа, что будет показано далее.

Геолого-геоморфологические факторы пространственной структуры пойменно-русловых комплексов

Оценка влияния геолого-геоморфологических особенностей на морфологию, структуру и динамику флювиального рельефа на уровне организации между отдельными формами русла и водотоками определяется неоднозначно. Ситуация отражает общие для географических наук проблемы изучения комплексов регионального ранга – выделения границ, обоснования морфологических характеристик, показателей динамики. В геоморфологии и гидрологии суши особенности организации флювиального рельефа на уровне между отдельными формами русла и гидрологической сетью считаются наименее разработанным (в сравнении с прочими уровнями) направлением, что проявляется в неустоявшейся терминологии, разнообразии подходов к выделению границ, принципов классификации, способов описания их морфологии и динамики. Для равнинных рек бассейна верхнего Днепра закономерными территориальными единицами организации флювиального рельефа на уровне между отдельными формами и гидрологической сетью предложено считать участки течения с пойменно-русловым комплексом (ПРК) одного типа. Комплексы рассматриваются как участки долины, в границах которых различия современной конфигурации русла и строения поймы несущественны. Однородное строение поймы как более устойчивая по сравнению с конфигурацией русла черта рельефа подтверждает развитие участка долины (русла, дна, склонов) как комплекса взаимосвязанных форм. Типи-

зация и выделение ПРК выполнено по схеме, предложенной А.В. Черновым [22]. Используются материалы космической съёмки (портал Google Earth), пространственное разрешение которых на большей части модельной территории достаточно для уверенного дешифрирования морфологических характеристик и особенностей русла и поймы за исключением верховий крупных и средних рек и водотоков малых порядков.

Особенности многолетней динамики ПРК определены для средних рек бассейна верхнего Днепра: Болва, Ипуть, Судость. Реки существенно отличаются площадью бассейнов – соответственно 2 324 км², 5 850 км², 10 900 км², но в остальном подобны – имеют широкопойменное, преимущественно меандрирующее русло, с высотой уступов пойменного берега 2–4 м. Территория бассейнов отличается разнообразной геолого-геоморфологической и ландшафтной структурой, влияние которой проявляется в соотношении морфодинамических типов русла, особенностях их конфигурации, специфике многолетней динамики отрезков течения. ПРК модельных объектов, выделенные только для участков меандрирующего русла, принадлежат двум типам – меандрирующего русла с сегментно-гвивистой и параллельно-гвивистой поймой. Относительно прямолинейные и разветвлённые на рукава участки русла в рамках данной работы не рассматриваются. Для р. Болва выделено 10, для р. Судость – 10, для р. Ипуть – 13 пойменно-русловых комплексов со средней протяжённостью по течению около 20 км. Фрагмент карты ПРК бассейна верхнего Днепра с пространственным распределением некоторых факторов динамики представлен на рис. 1.

Модельный отрезок течения р. Болва (нижняя часть бассейна) пересекает Жиздринскую возвышенную пологоволнистую песчаную аллювиально-зандровую равнину со средним эрозионным расчленением. Коренные карбонатные породы верхнемелового возраста залегают неглубоко и на отдельных участках выходят на поверхность. Песчаные пойменные берега на значительном протяжении цементированы гидроксидами железа. Литологические особенности строения долины ограничивают условия горизонтальных деформаций и определяют относительно высокий для региона уровень поймы над урезом – 4 м. Долина р. Судость разделяет правобережную возвышенную равнину с высоким эрозионным расчленением, сложенную с поверхности лессовидными суглинками, и левобережную Судость-Деснянскую моренно-зандровую равнину, сложенную флювиогляциальными песками. Бассейн р. Ипуть принадлежит двум физико-географическим районам – Приипутьской и Беседьско-Ипутьской зандровым равнинам. В рельефе преобладают участки плоских террасированных равнин, сложенных флювиогляциальными и аллювиальными песками и супесями, разделённых эрозионными формами. Характерными особенностями долины являются структурно обусловленное асимметричное строение, чередование тектонически обусловленных участков разного типа русла. Соотношение длины морфодинамических типов русла отражает геолого-геоморфологические особенности строения бассейна. Наиболее однородна в морфодинамическом отношении

р. Болва: 83% течения приходится на меандрирующий, 17% – на относительно прямолинейный тип русла. Доля прямолинейных участков в течении Судости составляет 18%, они сосредоточены в основном на участке долины с резко асимметричным строением. Правобережье здесь представлено лессовым плато, левобережье – аллювиально-зандровой равниной, сложенной супесчано-суглинистыми породами. При пересечении участка водно-ледниковой песча-

ной равнины в среднем течении появляются разветвленные на рукава участки длиной от 0,8 до 2,5 км (8% общей длины течения). В бассейне р. Ипатье чередование участков выровненных низменных аллювиально-зандровых равнин и относительно приподнятых эрозионно-расчленённых моренных равнин отражается в сравнительно высоком разнообразии типов русла: 28% приходится на разветвлённое на рукава, 11% – на относительно прямолинейное.

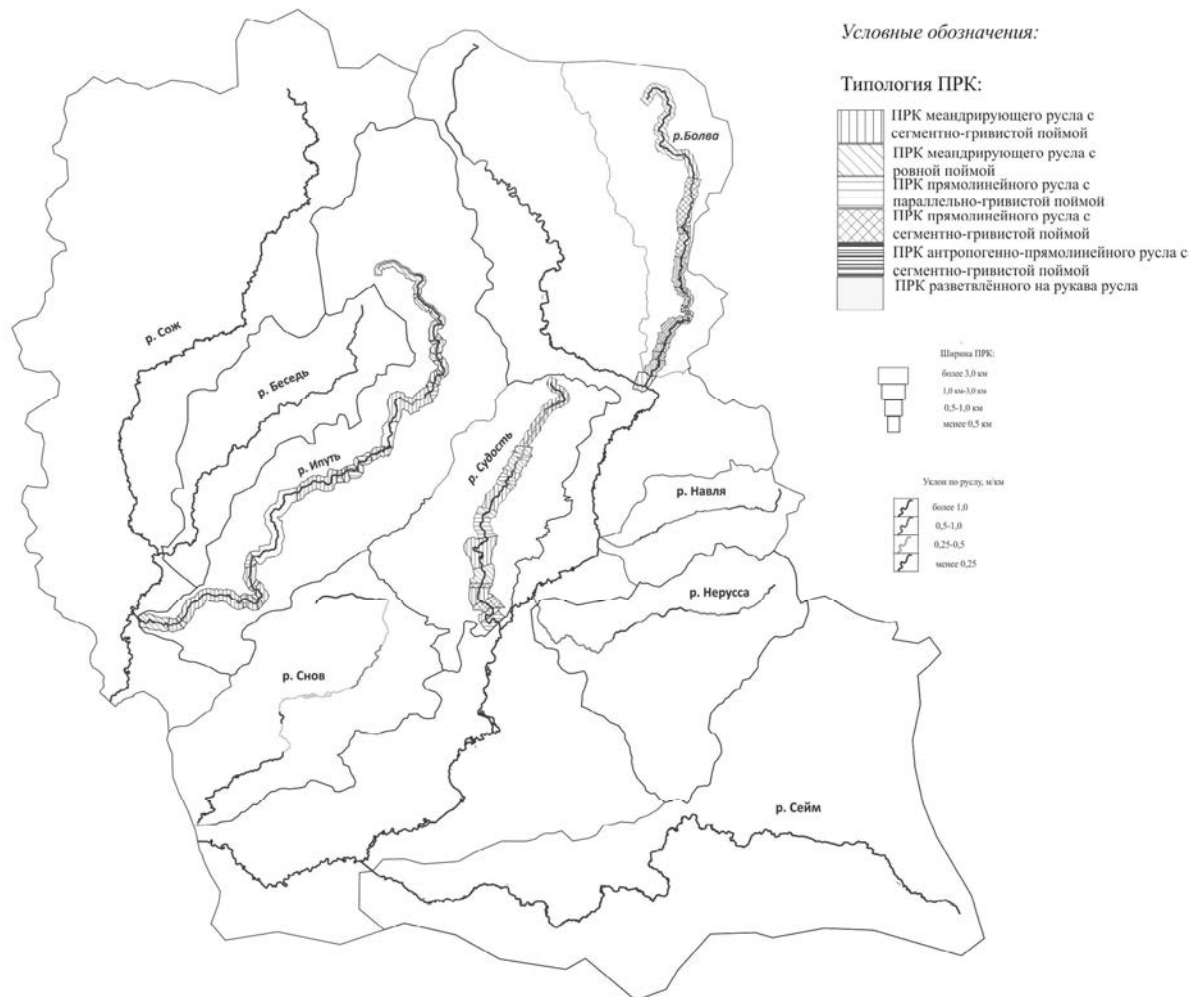


Рис. 1. Пойменно-русловые комплексы модельных рек в бассейне верхнего Днепра

Геолого-геоморфологические особенности территории проявляются в особенностях морфологической структуры ПРК и её устойчивости. Морфологическая структура ПРК выражена соотношением количества излучин разных типов, выделенных по классификации МГУ [23]. Предложенный показатель не является исключительно формальным, поскольку отражает особенности руслового процесса. На реках модельного региона представлены сегментные, сундучные, пальцевидные и, редко, омеговидные излучины. Высокая доля сегментных излучин соответствует ситуации, при которой скорости потока близки к критическим размывающим значениям для руслоформирующих грунтов. Большая доля сундучных излучин указывает на ограниченные условия горизонтальных деформаций, пальцевидных – на свободную поперечную трансформацию русла.

Среднее соотношение излучин разных типов в границах ПРК в современную эпоху объясняется различиями в сочетаниях руслоформирующих факторов. Доля сегментных излучин современного русла относительно велика для р. Судость (47%), меньше в ПРК р. Болва (41%). Доля пальцевидных излучин, напротив, для Судости меньше, чем для Болвы и Ипути (соответственно 28,30 и 34%). Относительно более высокая доля пальцевидных излучин Ипути связана с пересечением долиной депрессий рельефа, определяющим небольшую высоту берегового уступа, свободные условия пойменного стока. Особенности соотношения типов устойчивы во времени: относительно большая доля сегментных излучин в ПРК р. Судость и пальцевидных излучин в ПРК р. Ипатье сохраняется таковой от начала XX в. (табл. 1).

Устойчивость морфологической структуры предложено оценивать по масштабу морфодинамических и

морфологических преобразований, особенностям динамики отдельных русловых форм. Схема оценки представлена в табл. 2. Подход отражает масштаб изменений руслоформирующих факторов и глубину перестройки руслового процесса. Максимально возможное количество баллов (9) отличает весьма стабильные, практиче-

ски неизменные во времени пойменно-русловые комплексы. Минимально возможное количество баллов – 3 имеет потенциальное значение, характеризующее глубокую перестройку структуры ПРК, определённую изменениями ведущих факторов руслового процесса на региональном или глобальном уровнях.

Таблица 1

Динамика типов излучин в пойменно-русловых комплексах рек бассейна верхнего Днепра

Доля типа излучин в ПРК /годы	30-е гг. XX в.	80-е гг. XX в.	2000-е гг.
р. Болва			
Сегментные	0,38	0,45	0,42
Сундучные	0,30	0,19	0,28
Пальцевидные	0,32	0,36	0,30
р. Судость			
Сегментные	0,61	0,56	0,47
Сундучные	0,22	0,21	0,25
Пальцевидные	0,18	0,23	0,28
р. Ипуть			
Сегментные	0,31	0,45	0,44
Сундучные	0,27	0,23	0,22
Пальцевидные	0,41	0,32	0,34
Омеговидные	0,02	0,00	0,01

Таблица 2

Схема балльной оценки динамики ПРК в бассейне Верхнего Днепра

Баллы	Изменение морфодинамического типа	Изменение морфологии русла	Динамика форм меньшего порядка
1	Морфодинамический тип сохраняется	Конфигурация остаётся стабильной или изменяется несущественно	Типичные преобразования конфигурации или отсутствие изменений
2	Морфодинамический тип сохраняется на большей части отрезка течения	Конфигурация существенно изменяется на отдельных участках	Проявляются новые типы динамики русла
3	Морфодинамический тип преобразуется на большей части отрезка течения	Конфигурация существенно изменяется на большей части отрезка течения	Изменения конфигурации не унаследованы

Таблица 3

Баллы устойчивости русла и прочностные характеристики грунта

Номер модельного объекта	Динамика (баллы)	Средняя прочность грунтов берегового уступа, Н
р. Болва		
1	8	360
2	5	280
3	4	190
4	5	370
5	4	330
6	6	340
р. Судость		
1	5	250
2	5	200
3	7	230
4	4	260
5	5	320
6	9	350
7	4	350
8	6	650
9	6	220
р. Ипуть		
1	7	220
2	9	220
3	8	420
4	7	290
5	5	290
6	7	430
7	6	420
8	7	220
9	6	430
10	9	450

Показатели устойчивости установлены визуальным морфологическим анализом разновременных картографических материалов от середины XIX в. до начала XXI в. Границы периодов определены временем издания картографических материалов и проведения космической съёмки. Сведения о конфигурации русла в XIX в. получены по военно-топографическим картам масштаба 1 : 126 000, созданным под руководством Ф.Ф. Шуберта (состояние местности на 60-е гг. XIX в.). Источник информации о состоянии русла в XX в. – топографические карты масштаба 1 : 100 000 (состояние местности на 1928–1931 и 1988–1992 гг.), в XXI в. – материалы космической съёмки.

Распределение баллов динамики сопоставлено для ключевых участков с величиной средней прочности грунтов берегового уступа, определённой методом пенетрации (табл. 3). Номера ключевых участков увеличиваются вниз по течению. Пенетрация – способ инструментальной оценки прочности грунта по давлению, приложенному к металлическому стержню с конусом некоторого диаметра для проникновения в грунт на заданную глубину. Полученные значения существенно зависят от плотности и влажности – характеристик, сильно изменяющихся по сезонам, но синхронные измерения чувствительны к разнице прочности грунтов. Распределение результатов пенетрации и метода размывающей струи по разным типам грунтов согласуется.

Ряды значений прочности грунтов и устойчивости морфологической структуры не коррелируют в пространстве, что объясняется величиной руслоформирующих расходов, достаточной для размыва любых грунтов модельных ПРК. Особенности динамики ПРК не очевидно связаны и с гидрологическими характеристиками потока – значимого изменения устойчивости по течению не происходит. Для некоторых случаев сравнительно высокая или низкая устойчивость объясняется особенностями сочетания гидрологических характеристик и значений прочности, но закономерности не распространяются на соседние участки.

Геолого-геоморфологические условия оказывают существенно большее влияние на пространственную структуру ПРК, в сравнении с их динамикой за период в несколько десятилетий, что согласуется с описанным для отдельных русловых форм условием применимости факторов. Структура ПРК формируется за период больший, чем первые столетия, что подтверждается отсутствием её коренных перестроек, а краткосрочные изменения морфологии не позволяют достоверно оценить влияние относительно стабильного фактора – прочностных характеристик грунта.

Геолого-геоморфологические факторы организации гидрологических сетей малых порядков

Проявление геолого-геоморфологических особенностей территории в строении речных систем оценивается в рамках теории их организации, заложенной в геоморфологических исследованиях середины XX в. В дальнейшем усложнялся математический аппарат, описывающий принципы построения гидрологических сетей без принципиальных изменений основных теоретических положений: для водосборных бассейнов с относительно однородными геолого-геоморфологическими условиями для соседних иерархических уровней (порядков) свойственно постоянство соотношений количества водотоков, их средних длин и площадей бассейнов [24–29]. Формальное описание теории – постоянство гидрометрических показателей: коэффициентов бифуркации (K_B), коэффициентов длин ($K_{дл}$) и коэффициентов площадей ($K_{п}$):

$$K_B = Nx - 1/Nx,$$

$$K_{дл} = Lx - 1/Lx,$$

$$K_{п} = Ax - 1/Ax,$$

где N – количество водотоков; L – средняя длина водотоков; A – средняя площадь бассейна водотоков порядка x .

Модель организации гидрологической сети предполагает её формирование на относительно однородной поверхности с некоторым постоянным значением прочностных характеристик меньшими, чем критическая скорость потока. В этом случае водотоки разных порядков формирующей гидросети соединены последовательно – притоком реки порядка n может быть только водоток порядка $n-1$. Необходимыми условиями минимального расхождения модельных и измеренных характеристик гидросети считаются относительная геолого-геоморфологическая, ландшафтная однородность территории бассейна. Нарушения теоретической модели проявляются в непоследовательном соединении притоков разных порядков. Водотоки 1–2-го порядка, непосредственно впадающие в крупные реки (5–6-й порядок), крупнее, чем классические верхние звенья гидросети, имеют большую длину, площадь бассейна, объём стока. Широкое распространение непоследовательных соединений рассматривается как признак неравномерного геоморфологического развития территории, неодинаковых литологических особенностей.

Границы применимости классической модели эрозийного развития гидросети определены для бассейнов рек 4-го порядка в верхней левобережной части бассейна Днепра, относительно однородных по геолого-геоморфологическим особенностям и ландшафтной структуре. Выполнен анализ пространственного распределения коэффициентов бифуркации, нарушения последовательности соединения водотоков. Морфометрические и геолого-геоморфологические характеристики бассейнов получены сопоставлением цифровых моделей рельефа (SRTM 3.0) и гидрологической сети территории; электронных версий геологических и ландшафтных карт. Программные средства приложения Global Mapper использованы для построения векторных моделей бассейнов, сопоставления тематических геоизображений, расчёта морфометрических характеристик рельефа.

Таблица 4

Распределение притоков разных порядков для некоторых речных бассейнов левобережья верхнего Днепра

Бассейны рек 4-го порядка	Площадь, км ²	Количество притоков			Коэффициент бифуркации		
		1-го порядка	2-го порядка	3-го порядка	N_2/N_1	N_3/N_2	N_4/N_3
Коста	544,4	32	10	3	3,2	3,3	3,0
Опороть	534,6	20	8	3	2,5	2,7	3,0
Сев	1616,0	39	10	3	3,9	3,3	3,0
Воронуса	800,7	24	7	3	3,4	2,3	3,0
Усожа	680,0	19	5	2	3,8	2,5	2,0
Знобовка	716,0	21	7	2	3,0	3,5	2,0
Унеча	1276,4	65	16	5	4,1	3,2	5,0
Сеща	240,6	25	5	1	5,0	5,0	1,0
Велья	138,9	11	4	1	2,8	4,0	1,0
Рошь	204,1	16	5	4	3,2	1,3	4,0
Габья	465,9	26	10	2	2,6	5,0	2,0
Уса	180,0	10	5	1	2,0	5,0	1,0
Белизна	252,7	16	6	1	2,7	6,0	1,0
Песочня	288,5	15	6	1	2,5	6,0	1,0
Сенна	208,1	13	6	1	2,2	6,0	1,0
Цата	880,3	23	7	1	3,3	7,0	1,0
Рассуха	330,4	21	8	1	2,6	8,0	1,0
Овсорок	288,5	24	9	1	2,7	9,0	1,0

Существенно отличающиеся значения коэффициента бифуркации характеризуют неравномерность развития гидросети или различия условий стока. Постоянство бифуркации оценивается средней разностью значения K_B для притоков разных порядков – коэффициентом постоянства бифуркации ($K_{ПБ}$):

$$K_{ПБ} = (N_2/N_1 + N_3/N_2 + N_4/N_3)/3,$$

где N_x – количество водотоков порядка x (табл. 4, 5). Сведения о количестве притоков разных порядков, значений коэффициентов бифуркации и постоянств бифуркации представлены в табл. 4, 5.

Большие значения коэффициента в рамках теории эрозионного развития объясняются неодинаковыми геолого-геоморфологическими условиями бассейна, что для левобережья верхнего Днепра не подтверждается пространственным анализом тематических карт и статистическими методами – корреляционная зависимость площади бассейна (как показатель однородности условий) и $K_{ПБ}$ отрицательные ($-0,5$). Главной причиной, определяющей расхождение организации гидросети в сравнении с классической моделью, является влияние развития гидросетей соседних территорий через свободное или ограниченное формирование верхних звеньев, которое можно образно характеризовать как «конкуренцию водотоков».

В идеальных свободных условиях развитие гидросети в целом соответствует эрозионной модели, бассейны имеют трапециевидную форму, значительно расширяющуюся к верховьям. В ограниченных условиях возможно формирование симметрической (прямоугольной или округлой) и асимметрической конфигурации бассейна. В первом случае развитие гидросети ограничивается параллельно текущими водотоками, во

втором – верхними звеньями соседней гидросети на водоразделе. Асимметрическая конфигурация формируется при перераспределении стока в направлении одного из бассейнов на ограниченном участке – наиболее распространённый случай. В ограниченных условиях широко распространены нарушения последовательности соединения притоков. Перераспределение стока между соседними бассейнами ограничивает на отдельных участках развитие верхних звеньев гидросети притоков и определяет непосредственное соединение водотоков малых порядков с главной рекой.

Для оценки значимости фактора рассчитаны отношения количества водотоков первого порядка, непосредственно впадающих в главную реку, их общего количества в бассейне ($N1/No_{бщ.}$); периметра и площади водосборного бассейна (P/S).

Первый показатель характеризует частоту нарушений последовательного соединения притоков, второй отражает степень асимметрии бассейна. Большие соотношения периметра и площади соответствуют бассейнам неправильной конфигурации, обусловленной перехватом части стока гидросетью соседней территории. Распределение описанных показателей представлено в табл. 5.

Особенности распределения проявляются в существенной прямой корреляционной связи показателей ($N1/No_{бщ.}$ и P/S) – $r = 0,7$; (P/S) и $K_{ПБ}$ – $r = 0,5$. Степень зависимости подтверждает описанную модель ограничений развития гидросети по эрозионной схеме. Непостоянство коэффициентов бифуркации связано с впадением в главную реку (4-го порядка) притоков порядков меньше 3-го (преимущественно 1-го), что в свою очередь объясняется перераспределением стока между бассейнами.

Таблица 5

Распределение показателей условий развития гидросети для некоторых речных бассейнов на левобережье верхнего Днепра

Бассейны рек 4-го порядка	КПБ	$N1/No_{бщ.}$	P/S , км/км ²
Коста	0,23	0,28	0,19
Опороть	0,25	0,50	0,21
Сев	0,45	0,15	0,12
Воронуса	0,88	0,21	0,15
Усожа	0,90	0,53	0,20
Знобовка	1,00	0,48	0,26
Унеча	1,33	0,34	0,14
Сеща	2,00	0,56	0,30
Велья	2,13	0,45	0,35
Рошь	2,35	0,38	0,27
Габья	2,70	0,27	0,24
Уса	3,50	0,40	0,34
Белизна	4,17	0,44	0,29
Песочня	4,25	0,47	0,28
Сенна	4,42	0,46	0,30
Цата	4,86	0,22	0,18
Рассуха	6,19	0,43	0,27
Овсорок	7,17	0,38	0,28

Анализ геологических и геоморфологических материалов показывает, что основной причиной перехвата стока являются не различия в геологическом строении, прочностных свойствах грунтов, а неравномерность тектонических движений на площади в несколько тысяч квадратных километров.

Учитывая вышесказанное, можно сделать выводы, что на разных уровнях организации влияние геолого-геоморфологического фактора проявляется в особенно-

стях морфологии, структуры и динамики флювиального рельефа.

Влияние фактора на особенности динамики и пространственной структуры особенно существенно для форм с типичным периодом развития в несколько десятилетий – излучин современного русла. Для более высоких уровней организации флювиального рельефа – пойменно-русловых комплексов – действие фактора проявляется в особенностях их пространственной структуры.

На уровне гидрологических сетей и водосборных бассейнов действие фактора проявляется в отклонении структуры от модели, определённой классическим эрозионным развитием флювиального рельефа.

Зависимости имеют вероятностный характер, определённый динамикой как смежных, так и относительно

удалённых аналогичных форм, влияние которых трудно поддаётся формализации.

Обосновано использование специфических способов описания геолого-геоморфологического фактора, зависящих от иерархического уровня модельных объектов и специфики региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. Т. 2 : Наносы и русло. М. : Гостехиздат, 1955. 324 с.
2. Мирцхулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии грунтов русел. Л. : Гидрометеиздат, 1988. 304 с.
3. Лохтин В.М. О механизме речного русла. СПб., 1897.
4. Маккавеев Н.И. Эрозионно-аккумулятивные процессы и рельеф русла рек. Избранные труды. М. : МГУ, 1998. 285 с.
5. Великанов М.А. Русловой процесс. М. : Госфизматиздат, 1958. 395 с.
6. Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М. : Транспорт, 1972. 216 с.
7. Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л. : Гидрометеиздат, 1975. № 4. С. 104–108.
8. Шмакова М.В. Математическое моделирование речных потоков. СПб. : Лема, 2011. 76 с.
9. Бастраков Г.В. Эрозионная устойчивость рельефа и противоэрозионная защита земель. Брянск : Изд-во БГПИ, 1994. 260 с.
10. Лобанов Г.В., Полякова А.В., Новикова М.А. и др. Подходы к исследованию прочностных характеристик грунтов как фактора устойчивости пойменно-русловых комплексов (на примере бассейна Верхнего Днепра) // Географический вестник. Пермь : РИО ПГНИ, 2012. № 2. С. 14–22.
11. Бастраков Г.В. Эрозионная устойчивость рельефа и противоэрозионная защита земель. Брянск : Изд-во БГПИ, 1994. 260 с.
12. Лобанов Г.В. Подходы к исследованию прочностных характеристик грунтов как фактора устойчивости пойменно-русловых комплексов (на примере бассейна Верхнего Днепра) // Г.В. Лобанов, А.В. Полякова, М.А. Новикова и др. Географический вестник. Пермь : РИО ПГНИ, 2012. № 2. С. 14–22.
13. Назаров Е.Н., Егоркина С.С. Реки Пермского Прикамья: Горизонтальные русловые деформации. Пермь : ИПК Звезда, 2004. 155 с.
14. Рысин И.И., Петухова Л.Н. Русловые процессы на реках Удмуртии. Ижевск : Ассоциация Научная книга, 2006. 176 с.
15. Лобанов Г.В., Полякова А.В., Новикова М.А. Вероятностный подход к оценке устойчивости рельефа (на примере горизонтальных русловых деформаций в среднем течении р. Десна) // Сборник материалов VIII семинара молодых ученых вузов, объединяемых Межвузовским научно-координационным советом по проблемам русловых, устьевых и эрозионных процессов при МГУ им. М.В. Ломоносова. Уфа, 2010.
16. Злотина Л.В., Беркович К.М. О влиянии прибрежной растительности на русловые процессы // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 31–37.
17. Hooge J.M. Spatial variability, mechanisms and propagation of change in an active meandering river // *Geomorphology*. 2007. Vol. 84. P. 277–296.
18. Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии. М. : Государственное издательство иностранной литературы, 1948. 159 с.
19. Strahler A.N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geolog. Sec. Am. Bull.*, 63: 1952. P. 1117–1142.
20. Природные ресурсы и окружающая среда субъектов Российской Федерации. Центральный федеральный округ. Брянская область / Администрация Брянской обл.; под ред. Н.Г. Рыбальского, Е.Д. Самотесова, А.Г. Митюкова. М. : НИИ-Природа, 2007.
21. Шевченко П.Г. Геоморфология долины Десны и современные геоморфологические процессы // Долина Десны: природа и природопользование. М. : МФГО СССР, 1990. С. 3–12.
22. Смирнова Е.А., Лобанов Г.В. Морфологические изменения русла р. Десны в конце XX – начале XXI в. // Материалы VI семинара молодых ученых. Общие и прикладные вопросы эрозионных, устьевых и русловых процессов. М. : МГУ, 2006. С. 213–216.
23. Смирнова Е.А., Лобанов Г.В., Бастраков Г.В. Влияние прочностных характеристик грунтов на интенсивность русловых деформаций в среднем течении р. Десны // *Геоморфология*. 2009. № 2. С. 75–84.
24. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М. : ЛКИ, 2008. 608 с.
25. Бастраков Г.В. Эрозионная устойчивость рельефа и противоэрозионная защита земель. Брянск : Изд-во БГПИ, 1994. 260 с.
26. Чернов А.В. География и геоэкологическое состояние русел и пойм рек Северной Евразии. М. : Крона, 2009. 684 с.
27. Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излуины. М. : Изд-во МГУ, 2004.
28. Fractal river networks. Horton's laws and Tokunaga cyclicity David G. Tarboton *Journal of Hydrology* 187 (1996) 105–117 // *Journal of Hydrology*. 1996. № 187. P. 105–117.
29. Tokunaga E. Consideration on the composition of drainage networks and their evolution. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*. 1978. № 13.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 7 февраля 2013 г.