

УДК 551.435.11:551.438.5 (282.247.41)

© 2019 г. К.М. БЕРКОВИЧ*, Л.В. ЗЛОТИНА**, Л.А. ТУРЫКИН

РАЗМЫВ РЕЧНЫХ БЕРЕГОВ: ФАКТОРЫ, МЕХАНИЗМ, ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия*

**E-mail: berkovitch@yandex.ru, **E-mail: zleonora@yandex.ru*

Поступила в редакцию 28.11.2017

После доработки 20.08.2018

Принята к печати 18.12.2018

Размывы речных берегов представляют собой большую опасность для расположенных на берегах городской застройки, сооружений и коммуникаций. Размыв берегов, как составная часть горизонтальных деформаций русел, является многофакторным явлением. Эмпирические данные свидетельствуют о том, что размывы берегов зависят от размера реки, морфометрии излучин, расходов воды, однако большую роль играет противоэрозионная устойчивость берегов, обусловленная их строением и растительностью. Она меняется при переменном увлажнении в соответствии с гидрологическим режимом реки. Деятельность человека вносит существенный вклад в интенсификацию горизонтальных деформаций, особенно создание водохранилищ, изменяющих гидрологический и русловой режим рек. Врезание, суточное регулирование стока, перераспределение годового стока, сокращение стока наносов — ведущие факторы усиления размыва берегов. Как пример рассмотрены участки Волги и Шексны в нижнем бьефе Рыбинского гидроузла, где отчетливо проявились все эти факторы. Их учет позволил сделать прогноз размыва берегов рек в пределах города, который послужил основой для берегоукрепительных работ. В результате ликвидирована опасность разрушения, угрожавшая жилым зданиям и другим объектам.

Ключевые слова: русловые процессы, эрозия берегов, антропогенные нарушения.

<https://doi.org/10.31857/S0435-4281201923-17>

RIVERBANK EROSION: FACTORS, MECHANISM, HUMAN ACTIVITY

K.M. BERKOVICH*, L.V. ZLOTINA, L.A. TURYSKIN**

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

**E-mail: berkovitch@yandex.ru, **E-mail: zleonora@yandex.ru*

Received 28.11.2017

Revised 20.08.2018

Accepted 18.12.2018

The riverbank erosion produces a great risk for the urban development, structures and communications located on the banks. Bank erosion, as an integral part of the lateral river channel migrations, is a multi-factorial phenomenon. Empirical evidence suggests that the riverbank erosion depends on the size of the river, the morphology of the bends, water flow; however, a big role plays erosion resistance of the banks, due to their structure and vegetation. It varies at changeable riverbank soils wetting in accordance with the hydrological regime of the river. Human activity contributes significantly to the intensification of lateral migrations, especially the construction of reservoirs that change the hydrological regime of rivers and sediment transport. Incision, daily flow regulation, redistribution of annual runoff, reducing the sediment load are the main factors that intensify the riverbank erosion. As an example, the situated downstream of the dam sections of the Volga River and Sheksna River in the Rybinsk City were examined and all these factors were revealed there themselves clearly. Considering these factors allowed predicting the riverbank erosion and provided the basis for bank protection program.

Keywords: fluvial processes, riverbank erosion, human induced disturbances.

Введение

Размыв (эрозия) речных берегов — инженерный, геологический и даже социально-экономический термин, отражающий часть более широкого понятия — горизонтальных (плановых, боковых) деформаций русла реки. Горизонтальные деформации — это перемещение в плане русла реки, текущей в податливых эрозии грунтах. Перемещение русла реки — естественный геоморфологический процесс, который происходит на всех реках, приспосабливающих размер и форму русла для переноса воды и наносов с водосбора. Оно включает боковое смещение (перпендикулярно к центральной линии русла) и смещение вдоль оси русла. В процессе перемещения русла образуется пойма; русло и все дно долины сужается или расширяется. Наиболее ярко горизонтальные деформации выражаются в меандрировании, поэтому большинство работ, посвященных размывам берегов, рассматривает именно меандрирующие русла. В них происходят обычно сопряженные размывы и намывы берегов (размыв одного берега сопровождается накоплением наносов у противоположного). Однако боковое перемещение испытывают русла и других морфодинамических типов (прямолинейные, разветвленные на рукава). Например, в разветвленных руслах часто наблюдается перемещение островов вверх или вниз по течению, обусловленное размывом одной части острова и накоплением наносов — на другой. Р. С. Чалов [1] установил, что горизонтальные деформации развиваются в различных пространственно-временных масштабах от направленных (многолетних, вековых) деформаций, охватывающих большие участки рек до текущих (кратковременных, внутрисезонных), развивающихся на коротких участках.

В процессе горизонтального перемещения река встречает три геоморфологических элемента речной долины: это — коренные берега, речные террасы и пойма. Они различаются геологическим строением и взаимоотношениями с речным потоком. Особое место среди приречных земель занимают речные поймы. Они сложены разнообразным рыхлым материалом и контактируют с потоком постоянно, как в межень, так и в половодье. От периодического нарушения пойменных берегов эрозией и аккумуляцией зависит сукцессия пойменной растительности и эволюция экосистемы долины.

Освоение и развитие приречных территорий часто встречается с трудностями в виде горизонтальных деформаций, скорость которых может достигать нескольких десятков и даже сотен метров в год. Прежде всего, речь идет о размыве берегов, на которых располагаются сооружения и коммуникации, требующие защиты. Природные

процессы, связанные с рекой, становятся опасными для человека в том случае, когда при проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений не учитывается возможность бокового перемещения русла реки. Например, при возведении строений на пойме для них автоматически возникает опасность не только затопления при наводнении, так и разрушения при боковых перемещениях русла. Прокладка коммуникаций и строительство вблизи береговой линии, не учитывающие динамики природных процессов, также подвергают их опасности разрушения. Кроме того, в результате деятельности человека часто происходят нарушения природных факторов (или возникают новые), непосредственно влияющие на горизонтальные перемещения русла; они интенсифицируются или развиваются на нетипичных участках. В ряде случаев ускоренная эрозия берегов является главным поставщиком наносов в реку.

Эрозия речных берегов представляет собой многофакторное явление, оно изучается разными научными дисциплинами. Водная эрозия берегов часто определяется как удаление берегового материала под действием руслового потока. Однако, это только часть сложного процесса, в результате которого берег разрушается. Для прогноза горизонтального смещения русла важен учет местной морфологии русла, расхода воды и уклона, а также особенностей литологического строения, крутизны берега, характера растительного покрова. К этому добавляется влияние на указанные факторы сооружений и мероприятий, построенных и проводимых в долине и русле реки (плотины, русловые карьеры, мостовые переходы, берегоукрепительные сооружения).

Методика исследований

Основой работы послужили наблюдения за деформациями русел многих рек Европейской территории и Сибири, проведенные в 1970–2010-е гг.: Оби, Амударьи, Лены, Северной Двины, Вычегды, Сухоны, Печоры, Днепра, Оки и других. Для оценки интенсивности горизонтальных русловых деформаций рек проводилось сопоставление разновременного картографического материала на отдельных их участках: карт русла, топографических карт, аэрофото- и космических снимков. При этом использовались реперные точки, а также специальные программы, в частности, MapInfo. Строились схемы горизонтальных деформаций, просчитывались площади деформаций и их объем, а также скорость отступления и наращивания берегов. Выявлялись связи полученных динамических характеристик с гидравлическими характеристиками потока, крупностью донных наносов, показателями устойчивости русел. На участках рек ниже плотин анализировались данные гидрологических наблюдений: внутригодовое распределение стока, суточные и недельные колебания расходов и уровней. Детальные исследования деформаций берегов Волги в Рыбинске включали подробные съемки береговых откосов и промеры русла, сопоставление их за разные годы; документировались литологическое строение берегов и характер антропогенной нагрузки.

Подходы к прогнозу горизонтальных деформаций русла

Существуют два подхода к анализу и прогнозу размыва берегов — эмпирический и физический (механический) [2]. Наиболее распространен эмпирический подход, который связывает скорость смещения русла с комбинацией факторов: шириной русла, длиной и шагом меандр, радиусом кривизны, углом разворота, а также с руслоформирующим (в разных вариантах) расходом воды и уклоном. Как видно из перечня факторов, наибольшее внимание уделяется смещениям меандрирующе-

го русла, для которых характерны высокие скорости как самого смещения, так и потенциальной опасности. Согласно обзору [3], средние скорости смещения меандрирующих русел на реках мира составляют 5–10 м/год, что уступает только скорости смещения блуждающих русел. Экстремально большие скорости размыва берегов излучин в несколько раз и даже на порядок превышают средние значения. На анализе морфометрии излучин и стадии их развития построена методика прогноза, разработанная в Государственном гидрологическом институте [4]. На сопоставлении глубины русла в половодье и в межень, высоты берега и амплитуды уровня основана методика, предложенная в ПНИИС [5], включающая также экспериментальный коэффициент размываемости грунта берега, максимальный для песка и минимальный для суглинка. В обоих случаях считается, что берег отступает параллельно самому себе без изменения крутизны откоса, и весь материал выносится потоком. В то же время можно полагать, что с уменьшением скорости размыва (по мере увеличения кривизны излучины) все меньше материала может выноситься из прибрежной зоны, и профиль откоса будет трансформироваться, однако отступление бровки берега продолжится.

Наиболее отчетливой является зависимость скорости отступления берега от радиуса кривизны (R_k) и его соотношения с шириной русла (R_k/B). Согласно наблюдениям, наибольшая скорость смещения излучин наблюдается при соотношении R_k/B между 1.6 и 3.0, с увеличением и уменьшением соотношения скорость смещения уменьшается. Многочисленными экспериментами установлено [4], что скорость смещения свободных меандр увеличивается до достижения ими отношения длины излучины к ее шагу величины 1.6. Это согласуется с представлениями Н. И. Маккавеева [6], который утверждал, что при указанном соотношении теряется гидравлическая выгодность извилистой формы русла. Интенсивность эрозии берегов на участке реки зависит от количества на нем относительно пологих динамичных излучин, доля которых во многом определяется средним многолетним расходом воды [7]. На основании данных экспериментальных исследований [8] получено, что скорость смещения меандра пропорциональна уклону реки и скорости течения в четвертой степени. В. И. Замышляев [9] теоретически показал, что скорость размыва берега излучины пропорциональна квадрату средней скорости течения и обратно пропорциональна радиусу кривизны излучины. Локализация размыва берегов зависит от морфодинамического типа русла. Опыт показывает, что наиболее интенсивно размыв идет на вогнутых берегах относительно пологих излучин свободно меандрирующих рек; в прямолинейных руслах размыву подвергаются вогнутые берега изгибов потока, где он отбекает прирусловые отмели (побочни).

Другим направлением эмпирических исследований закономерностей размыва речных берегов является выявление их связи с расходом воды. Предложена достаточно простая зависимость [10]: $C = k_1 Q^n$, где C — скорость эрозии в м/год и Q — характерный расход воды, м³/с. На основе обзора скорости смещения меандра на реках мира определено, что лучшие результаты для прогноза скорости смещения меандра дает т. н. руслонаполняющий (в бровках поймы) расход (Q_f), значение коэффициента $k_1 = 0.0435$, $n = 0.6$. Показано также, что смещение меандра связано с полной мощностью потока: $w = \rho g Q_f I$ ($\rho = 1000$ кг/м³): $C = k_2 w^m$. Для рек Австралии коэффициент $k_2 = 0.025$, а показатель степени $m = 0.53$ [11].

Этот подход был применен для оценки размыва берегов рек бассейна Урала [12]. Соответствующие коэффициенты и показатели степени равны: $k_1 = 0.179$, $k_2 = 0.039$, $n = 0.46$, $m = 0.69$. Существенное увеличение интенсивности горизонтальных деформаций наблюдается на реках 9–10 порядков. Средние скорости размыва берегов на свободных излучинах, изменяются от 0.5–1.5 до 2.5–3.0 м/год. Связь скорости размыва берегов со средним максимальным расходом воды (примерно соответствует руслонаполняющему) достаточно тесная: коэффициент R^2 в обоих случаях равен 0.73. Разброс значений объясняется, очевидно, характером растительности и геоло-

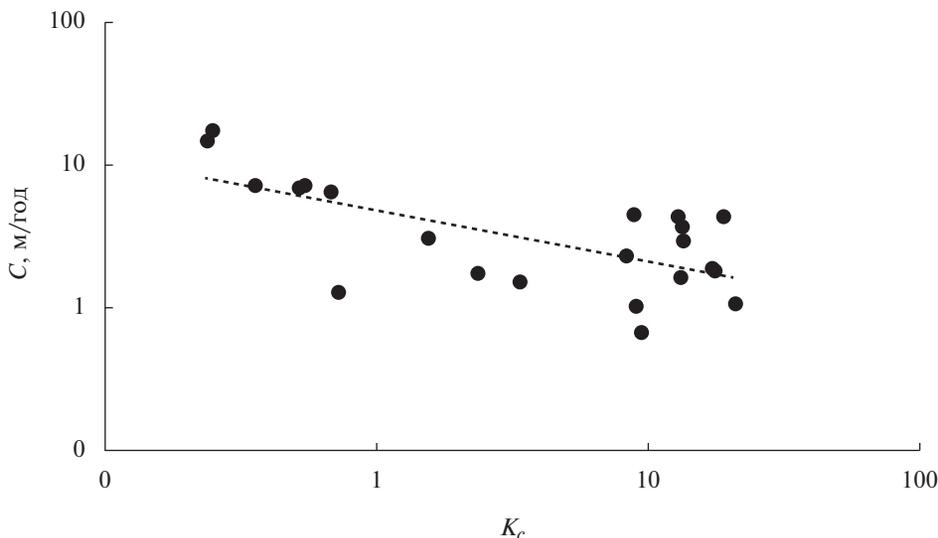


Рис. 1. Связь скорости размыва берегов и коэффициента стабильности русла (K_c)

гическим строением береговых отложений. Эти закономерности показывают, что скорость размыва берегов увеличивается с увеличением размера реки, а некоторые авторы указывают на связь размыва с площадью бассейна [13].

К эмпирическим можно отнести также подход, примененный К. М. Берковичем и Б. Н. Власовым [14]: размыв берега реки пропорционален транспортирующей способности потока и обратно пропорционален высоте берегового откоса и крупности донных наносов. На основе измерения реальных скоростей размыва берегов были вычислены эмпирические коэффициенты пропорциональности, которые, как оказалось, связаны с шириной русла. Это отражает тот факт, что скорости размыва речных берегов зависят от размера реки: в среднем они составляют за год несколько процентов меженной ширины русла. Так, на основе анализа данных по 500 участкам рек разных типов [3] установлено, что скорости размыва в среднем составляют 1–3% ширины русла.

Зависимость горизонтальных деформаций от ширины русла эмпирически выявлена в начале XX века. Косвенно она выражается коэффициентом В. Г. Глушкова [15] ($\Gamma = \sqrt{B/h}$), величина которого для русла в прочных берегах минимальна (1.4) и увеличивается в размываемых, превышая 5. Так, на известных малой устойчивостью русла верхней Оби, нижней Катуня, Чарыше $\Gamma = 8-12$, на блуждающем участке Хуанхэ $\Gamma = 28-40$ [16], на верхней Оке, отличающейся стабильным руслом, $\Gamma = 1.8-2.0$. Вместе с тем зависимость скорости размыва берегов от Γ не выявлена. Для качественной оценки горизонтальной (поперечной) устойчивости русла иногда применяется коэффициент, полученный С. Т. Алтуниным [17] и связывающий ширину русла с расходом воды и уклоном. Наименьшей устойчивостью, например, отличается блуждающее русло Хуанхэ в нижнем течении, высокая устойчивость характерна для слабоизвилистого русла верхней Оки.

Другим коэффициентом, который отражает относительную устойчивость русла в горизонтальном направлении, может служить коэффициент стабильности Н. И. Маккавеева [6]: $K_c = 100d/BI$ (d — средний диаметр донных наносов, I — уклон). Вычисление K_c по 24 рекам Европейской части России и Западной Сибири и сравнение со скоростями размыва берегов показало отчетливую обратную зависимость (рис. 1).

Физический подход к оценке горизонтальных деформаций

Этот подход предусматривает разработку математической модели распределения скоростей течения в поперечном сечении. В прямом русле с симметричным поперечным сечением наибольшая скорость наблюдается в центре русла. В изогнутом русле, которое имеет асимметричную форму, возникают вторичные течения и струи с наибольшей скоростью смещаются к внешнему берегу. Модель [18] представляет произведение некоторого эрозионного коэффициента на разницу скорости у берега и средней в сечении:

$$C = e^*(v_b - v),$$

где e^* — эрозионный коэффициент.

Эрозионный коэффициент обычно определяется путем калибровки на основе изменений плановой формы русла во времени; он отражает геотехнические свойства материала берега, а также влияние растительности на прибрежную часть потока и прочность берега. Коэффициент варьирует в широких пределах в связи с высотой берега, локальным уклоном, шириной русла и наличием наносов для отложения на побочках. На основе специальных исследований с помощью струйного размыва [19] установлена прямая зависимость между эрозионным коэффициентом e^* и размерным коэффициентом, связывающим величину размыва с разницей действующего и критического касательных напряжений для разных грунтов (k_c), выражающим объем размыва на единицу импульса силы. Обнаружено, что e^* изменяется в зависимости от свойств грунта. Например, для песчаного грунта $e^* = 5.3 \cdot 10^{-7}$, для глинистого $e^* = 2.1 \cdot 10^{-7}$. Физическая модель имеет ограничения в применении, так как не отражает полностью механизм разрушения берега реки.

Другая распространенная модель основана на концепции устойчивости берегового откоса в связи со свойствами слагающих его грунтов [20]. Берег может оставаться устойчивым [21] при определенном сочетании свойств слагающего его грунта: сцепления (c), объемного веса (γ) и угла внутреннего трения (ϕ). $H_c = 4c/\gamma \operatorname{ctg}\phi/2$, H_c — критическая высота берега. Определенную роль в устойчивости берега играет соотношение угла наклона берега и угла внутреннего трения [22]. Устойчивость берега обратно пропорциональна углу его наклона, вместе с тем, с уменьшением угла внутреннего трения падает также устойчивость берега. Изменение какого-либо или всех свойств приводит к тому, что береговой откос выходит из состояния равновесия и разрушается тем или иным способом. В простейшем случае однородного строения речного берега нарушение равновесия происходит с большей или меньшей периодичностью, обусловленной гидрологическим режимом реки, направленностью эрозионно-аккумулятивных процессов в русле и антропогенными нарушениями. Таким образом, речные берега отличаются прерывистым разрушением.

Механизм размыва (разрушения) речных берегов

Размыв берегов является сочетанием двух процессов: обрушение грунтовых масс, слагающих береговой откос, в реку и перенос обрушившегося материала потоком. Первый процесс определяется свойствами грунта (чередование слоев, объемный вес, сцепление, угол внутреннего трения) и морфологией откоса (высота, угол склона). Второй процесс целиком зависит от транспортирующей способности потока и морфологии речного русла. Опыт показывает, что чем выше берег, тем медленнее в многолетнем аспекте он разрушается. Правда, иногда оказывается, что отступление более высокого берега происходит с большей скоростью. Прямая зависимость скорости размыва от высоты берега может наблюдаться, если поток достаточно мощный для

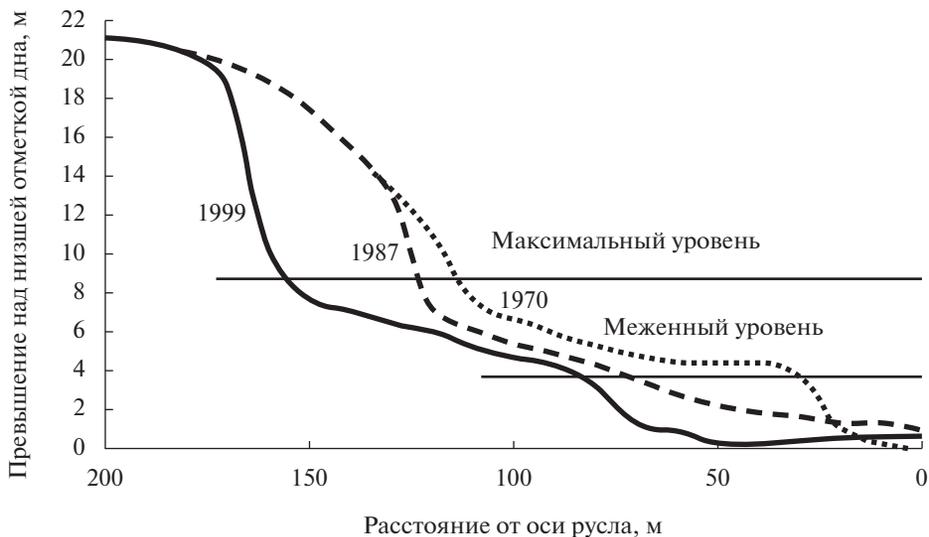


Рис. 2. Профиль левого берега Волги в Рыбинске и его трансформация по данным подробных съемок Рыбинского РГС УКИМ и съемки 1999 г., выполненной авторами

быстрого удаления любого количества материала, поступившего с берега. Если поток уносит материал постепенно в силу его большой крупности, обрушения крупными блоками или недостаточной мощности потока, то зависимость будет обратной, так как чем выше берег, тем больше материала поступает в реку.

Начало процесса отступления берега часто связано с разрушением основания откоса в силу каких-либо причин: размыв потоком основания берега, разрушение льдом, вытаивание мерзлого грунта, искусственное или естественное углубление русла. На подъеме и пике половодья, когда энергия потока наибольшая, дно русла в основании берега размывается, особенно, если основание берега сложено несвязным относительно мелким материалом. При врезании понижаются отметки дна и увеличиваются высоты берегового откоса. Одновременно с повышением уровня происходит насыщение грунта водой в результате фильтрации со стороны реки, намокание при повышении уровня грунтовых вод и капиллярном поднятии. Вес грунта увеличивается, зато уменьшается сцепление и угол внутреннего трения. В результате устойчивость грунта на откосе нарушается, и при спаде уровня воды грунт приходит в движение. Часто нарушается устойчивость целого массива грунта. Выявляется несколько главных видов разрушения берегов в зависимости от чередования и состава слоев их слагающих, а также интенсивности колебания уровня воды. К ним относится плоское оползание насыщенных водой блоков и смещение блоков по сферическим плоскостям, вызванное быстрым спадом уровня, жидкое течение водонасыщенного тонкозернистого материала, суффозия, обвалы, осыпи.

Грунт, поступивший к основанию берега, выносится потоком сразу или постепенно в соответствии с энергией потока, так что условия для дальнейшего отступления берега периодически обновляются. С течением времени берег стабилизируется, если уноса материала, отложившегося у основания берега, не происходит вследствие ослабления энергии потока. Профиль берега трансформируется, сохраняя характерные черты: крутую прибрежную часть и более пологие среднюю и нижнюю части. причем с течением времени пологая средняя часть увеличивается (рис. 2). Свойства берегового материала меняются в пространстве на относительно коротком расстоянии, что создает большую сложность для оценки и прогноза горизонтальных деформаций. Большую роль в естественных разрушениях речных берегов играет расти-

тельность, она достаточно случайна и локальна. В качестве механического эффекта растительности можно выделить увеличение устойчивости берега за счет плотности корневых систем.

Роль вмешательства человека в природную среду

Влияние хозяйственной деятельности человека на разрушение речных берегов включает два аспекта. Первый — непосредственное механическое нарушение приречной территории (строительство, прокладка коммуникаций), увеличение нагрузки на поверхность. Второй аспект — такие искусственные изменения гидрологического режима реки, морфологии и динамики русла, которые способствуют усилению горизонтальных деформаций. Наиболее значительное влияние на русло реки, ее берега и приречные территории оказывает регулирование русла, создание плотин и водохранилищ, русловые карьеры по добыче нерудных материалов. Так, расчистка и спрямление русел рек для увеличения пропускной способности и снижения опасности затопления прибрежных территорий вызывает резкие деформации берегов. Они обусловлены увеличением высоты и угла наклона береговых откосов вследствие земляных работ и сопровождающей их глубинной эрозии и потерей их устойчивости [23]. Аналогичную роль играют, очевидно, обширные русловые карьеры, в пределах которых глубина русла увеличивается в несколько раз. Например, при средней глубине плесовых ложин на верхней Оке 3–4 м глубина карьеров достигает 13 м, при разработке карьера в 50 м от пойменного берега угол наклона откоса увеличивается вдвое.

На участках рек ниже плотин гидроузлов деформации берегов нередко также усиливаются. Этому способствуют несколько обстоятельств: глубинная эрозия в нижних бьефах, внутригодовое перераспределение стока, гидравлические явления, обусловленные суточным регулированием мощности ГЭС, частое увлажнение береговых откосов, связанное с колебаниями урвны воды. Глубинная эрозия приводит к увеличению высоты береговых откосов, которое иногда бывает очень значительным в большом временном диапазоне [24], хотя не происходит быстро — до нескольких десятков сантиметров в год — и со временем замедляется. Гораздо большую роль играет частое увлажнение берега в ходе ежедневного повышения уровня. Уменьшения сцепления и угла внутреннего трения способствуют снижению устойчивости откоса. Причинами разрушения берегов в нижнем бьефе плотин часто являются интенсивная суффозия грунта береговых откосов фильтрационным потоком, направленным в русло в периоды резкого спада уровней воды в реке при практически мгновенном отключении агрегатов ГЭС, изменение направления потока и перераспределение расходов воды непосредственно ниже сооружений, воздействие волн от проходящих судов и др. [25]. Процесс трансформации русла нижнего бьефа, имеющий общую тенденцию к затуханию и к стабилизации русла на участке большой протяженности, заметно интенсифицируется при прохождении высоких паводков.

Многие авторы придерживаются мнения, что русла рек ниже больших плотин сужаются [2]. Однако, изменение ширины русла и размывы берегов — понятия не идентичные. Реакция ширины русла (и скорости эрозии берега) на регулирование стока неоднозначная: в разных условиях прослеживается тенденция как к расширению, так и сужению русла, во многих случаях ширина русла не меняется. Расширение русел отмечено в 46% нижних бьефов и лишь в 26% русло сузилось [26]. Сужение русла во многих случаях бывает искусственным — в результате создания выправительных сооружений. Причиной сужения русла является уменьшение максимальных расходов воды, оно лучше выражено на реках, разветвленных на рукава. Так, у плотины Новосибирского гидроузла ширина русла уменьшилась за счет отми-

рания пойменных протоков и причленения островов к берегу на фоне врезания, однако размывы берегов происходят очень интенсивно. Некоторое сужение русла Камы в нижнем бьефе Воткинского гидроузла не мешает быстрому размыву пойменных берегов, скорость которого достигала в 1995–2006 гг. 13 м/год.

Меандрирующие русла сохраняют свою ширину; скорость смещения меандр увеличивается в первые несколько лет после создания плотины, а в многолетнем плане уменьшается [26]. Это объясняется тем, что врезание наиболее интенсивно непосредственно у плотины в первые годы, уменьшаясь со временем или из-за формирования отмостки, или из-за уменьшения уклона. Кроме того, зона интенсивных горизонтальных деформаций перемещается вниз по течению от плотины.

Характерно, что размывы берегов чаще происходят ниже плотин гидроэлектростанций, тогда как ниже плотин, только срезающих паводки, русло рек сужается. Это приводит к выводу, что размывы берегов ниже плотин ГЭС более связаны не с сезонным регулированием стока, а с прохождением волн суточного регулирования.

На участке Оби в 15–20 км от плотины Новосибирского гидроузла в 1985–2004 гг. объем материала, поступившего от размыва берегов, превысил объем отложения на 40%; примерно такое же соотношение наблюдалось в нижнем бьефе Воткинского гидроузла на Каме. Наиболее интенсивно разрушение берегов происходит в течение первых 5–10 лет после создания гидроузла. Размывы берегов Оби ниже Новосибирской ГЭС в первые годы (1959–1975) усилились вдвое по сравнению с естественным режимом, но позднее скорость размыва снизилась до обычных для Оби значений 5–6 м/год. То же отмечалось в нижнем бьефе Цимлянского гидроузла. А. В. Серебряков [27] обнаружил высокие скорости размыва берегов в первое десятилетие после строительства Цимлянской плотины. Однако, средняя скорость горизонтальных деформаций русла Дона за весь период ее существования (1956–2006 г) составила 1.8 м/год, что в 2 раза меньше скорости горизонтальных деформаций за предыдущие 250 лет [28].

Следует отметить, что сужение русла часто обусловлено наступлением прибрежной растительности на прежде активную его часть [29]. При достаточном количестве наносов в пределах русла формируется новая пойма, которая быстро покрывается растительностью. При дефиците наносов и врезании растительность наступает на бечевники. Ведущий фактор сужения русла — уменьшение величины паводка, что нарушает режим, который влияет на формирование и сукцессию растительности. Изменение уровня режима Иртыша после создания Бухтарминского водохранилища привело к широкому распространению кустарниковой растительности на отмелях, причем граница растительности опустилась на 1.5 м [30].

Размыв берегов Волги и Шексны в пределах г. Рыбинска

К рекам, полностью испытавшим влияние деятельности человека, сказавшееся на приречных территориях, относятся Волга и Шексна в районе Рыбинска. Рыбинский гидроузел, построенный в начале 1940-х гг., отличается своеобразной компоновкой: 18-метровая плотина с водосбросом и шлюзом перегораживает русло Волги, образуя Рыбинское водохранилище объемом более 25 км³; гидроэлектростанция располагается отдельно от плотины на устьевом участке р. Шексны, русло которой используется для сброса воды во время работы гидроагрегатов.

Факторами, способствующими интенсификации разрушения берегов, здесь являются сезонное регулирование стока Рыбинским водохранилищем, работа гидроэлектростанции (суточное регулирование) и механическое изменение русла. Первый фактор выражается в значительном увеличении относительной водности межени, особенно зимней. Весенний сток уменьшился в 5–7 раз, тогда как сток за летнюю и зимнюю межень нередко достигает 70% годового.

Второй фактор — энергетические попуски и связанные с ними ежесуточные колебания уровней воды, достигающие 3.5 м и более. Динамическое воздействие волн попусков сказывается преимущественно на Шексне и лишь отчасти на участке Волги ниже впадения Шексны. Поэтому русло Шексны размывалось. Среднесуточные сбросы в среднем за год составляют от 600 до 1300 м³/с, что в 4–8 раз больше среднегодового расхода этой реки в естественном состоянии. Средняя скорость течения достигает 1.8 м/с. До создания в 1956 г. Нижегородского водохранилища ниже плотины ГЭС на Шексне наблюдалась интенсивная глубинная эрозия, скоростью которой составляла около 10 см/год. За период существования ГЭС русло Шексны углубилось в среднем на 3–4 м и симметрично расширилось на 200 м. Средняя скорость отступления берегов составила 4–5 м в год, а максимальная превышала 10 м/год.

Отрезок Волги от водосливной плотины до устья р. Шексны периодически подвергается воздействию активного потока во время пропуска высокого половодья, когда после заполнения водохранилища расходы воды превышают пропускную способность турбин. Это происходит не каждый год, тем не менее создает условия для приведения в движение донных грунтов. Не исключено также воздействие ломающегося ледяного покрова, в основном на берега. В межень на этом отрезке Волги течение переменное по направлению. Во время подъема уровня, обусловленного энергетическим попуском, течение направлено к плотине (“против течения” Волги), это происходит ежедневно в утренние часы. Остановка турбин вызывает резкий спад уровня, и течение направляется от плотины. То же происходит и во время вечернего пика нагрузки ГЭС. Средняя амплитуда колебания уровня составляет около 2 м, а максимальная — 3.5 м. Сложности гидравлической структуре потока добавляют в летне-осенний период волны шлюзования, ветровые и судовые волны, правда скорости течения, обусловленные ими, незначительны. Тем не менее, ширина русла Волги от плотины до устья Шексны за 50 лет увеличилась на 30%. При этом относительное расширение поперечного сечения у дна больше, чем у поверхности: если у поверхности ширина увеличилась в 1.5 раза, то у дна — в 4–6 раз.

Третий фактор — изменение формы и размеров поперечного сечения русла вследствие создания в 1950-х гг. судового хода в рамках Единой глубоководной системы, которая включала Волгу, Каму и Нижний Дон, а также разработка отдельных русловых карьеров. Ко времени пуска Рыбинского гидроузла меженные глубины на перекатах составляли 1–2 м. В настоящее время при низких уровнях воды максимальные глубины русла достигли 4.5 м, а в отдельных выемках — 7–8 м. Глубоководная трасса создавалась путем землечерпания в большом объеме; разработка прорезей глубиной более 3 м могла бы привести к существенной “посадке” меженных уровней воды, что сделало бы невозможным достижение запланированной глубины 4.5 м. Однако заполнение Горьковского водохранилища до проектной отметки повысило минимальный уровень, так что участок Волги у Рыбинска оказался в подпоре, что компенсировало возможное снижение уровня.

Берега Волги и Шексны в пределах города сложены легкими и средними моренными суглинками с включением гальки и валунов и прослоями тяжелых суглинков и глин, причем последние нередко залегают в основании берегов. Критическая высота берегов, при которой они еще сохраняют устойчивость, согласно расчету, при углах наклона 80–90° составляет в сухом состоянии грунтов 5.8–7.4 м, при углах наклона 40° она возрастает до 30 м. Вместе с тем в водонасыщенном состоянии критическая высота берегов резко уменьшается, и при углах наклона 80–90° составляет 4–5 м, а при углах наклона 40° — 12 м. Это превращает часть берегов в неустойчивые. Высота бровок берегов Волги в Рыбинске над средним меженным уровнем воды колеблется от 4.4 до 15.5 м при средних углах наклона в том же высотном диапазоне (бровка—урез) не более 26°. Можно полагать, что в естественном состоянии берега Волги и Шексны были достаточно устойчивыми и размывались в ограниченных местах и незначительными темпами.

Подмываемые в настоящее время берега Волги и Шексны представлены двумя формами по морфологии: 1) выпуклые в верхней части и крутые в нижней; высота крутой части 2–3 м над тыловой частью бечевника; 2) вогнутые, почти отвесные в верхней части; в нижней части склона и у бечевника накапливаются массы оползшего материала. В обоих случаях имеется более или менее широкий бечевник, сложенный валунно-галечным материалом.

На разных участках приречной территории в Рыбинске ведущая причина усиления деформаций берегов разная. Между водосливной плотиной и устьем Шексны основную роль играют, по-видимому, суточные колебания уровней, что приводит к снижению устойчивости грунта в результате частого увлажнения. Характерно, что наиболее серьезные зоны разрушения сосредоточены на вогнутых берегах пологих излучин динамической оси потока. Это подтверждается тем, что при ширине русла более 600 м среднее расстояние от тальвега до бровки подмываемых берегов составляет 120–160 м. Их возникновение еще много десятилетий назад было обусловлено тем, что в период естественного половодья с расходом в среднем 10 тыс. м³/с и амплитудой уровня 10 м здесь разрушались основания берегов, но из-за развития бечевников темпы размыва были относительно малыми. В условиях зарегулированного стока сброс паводковых вод через плотину в Староречье Волги осуществляется крайне редко и кратковременно, только в многоводные годы, когда приток воды в водохранилище превышает 10–11 тыс. м³/с. Вместе с тем для этого участка реки характерны значительные суточные колебания уровней. В 1980–1990-е гг. разрушение берегов ускорилось. Если в 1970–1987 гг. средняя скорость отступления бровок берегов составляла 3.3 м, то в 1992–1999 гг. 6.9 м. Так как фактор ежесуточного увлажнения берегового грунта можно считать неизменным с начала 1940-х гг., то ускорение деформаций берегов можно связать с произошедшими в 1990-е гг. механическими нарушениями и изменением гидрогеологических характеристик прилегающих территорий вследствие расположения в непосредственной близости от бровки берега жилых домов, корпусов промышленных предприятий, коммуникаций, концентрации стока поверхностных вод (талых и дождевых) с покрытых асфальтом или бетоном поверхностей по понижению рельефа и т. п.

Разрушение берегов Шексны обусловлено высокими скоростями течения, превышающими в период энергетических попусков 2 м/с, а также увеличением высоты откосов в связи с размывом дна на 4 м. Заметную роль в ослаблении устойчивости грунта играет его периодическое увлажнение при суточных колебаниях уровней.

Считается, что стабилизация берегового откоса наступает тогда, когда в основании берега сформируется пологонаклонная поверхность из обрушившегося материала, переработанного потоком, переходящая в подводный откос. Угол наклона такой поверхности (θ), достаточно стабильной для поселения на ней первичной растительности, предлагается принимать равной половине угла внутреннего трения [20]. Если спроектировать этот угол, близкий к углам современных устойчивых откосов, на высоту поверхности, можно получить максимально возможное отступление бровки берега до его полной стабилизации, которое равно горизонтальному расстоянию между пересечением предполагаемой линии стабильного откоса с бровкой поверхности. Расчет можно уточнить с учетом того, что крутизна откоса неодинакова по высоте: у бровки она достигает 90°, тогда как в средней части составляет 20–30° [31]. На основе этих предложений был разработан прогноз отступления бровок размываемых берегов Волги и Шексны.

Расчеты показали, что без берегоукрепительных работ они могут отступить на несколько десятков метров, пока не сложатся условия устойчивости береговых откосов. Соотношение реального отступления бровки левого берега Волги и прогноза деформаций приведено на рис. 3. С начала 2000-х гг. на этом участке реки выполнялись капитальные берегоукрепительные работы, обоснованием для которых послужили приведенные выше данные. Берегоукрепительные работы выразились



Рис. 3. Отступление левого берега р. Волги (1) и его прогноз (2)

в создании на левом берегу Волги от шлюза почти до устья Шексны сооружения, состоящего из шпунтовой стенки (в основании откоса) и набережной, а также крепления бетонной облицовкой склона по всей высоте. В результате ликвидирована опасность разрушения, угрожавшая жилым зданиям и другим объектам. Кроме того, улучшились эстетические качества берега реки.

Выводы

Освоение и развитие приречных территорий часто встречается с трудностями в виде размыва берегов, на которых располагаются сооружения и коммуникации. Природные процессы, связанные с рекой, становятся опасными для человека в том случае, когда при проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений не учитывается возможность бокового перемещения русла реки.

Разрушение речных берегов определяется сочетанием факторов, среди которых ведущую роль играют гидродинамическое воздействие потока, обеспечивающее размыв основания и вынос материала, а также изменение геотехнических характеристик грунта, слагающего берег. Деформации берега проходят ряд стадий, с течением времени берег стабилизируется, профиль берега трансформируется, при сохранении крутой прибрежной части увеличивается более пологая средняя и нижняя части.

Размывы берегов оцениваются эмпирически на основе зависимости их скорости от морфологии излучин, расхода воды, уклона. Кроме того, разработаны методы, основанные на сравнении энергии потока и сопротивления материала, слагающего берега.

Большую роль в усилении размывов берегов играет деятельность человека, и, прежде всего, создание водохранилищ, изменяющих гидрологический и русловой режим рек. Врезание, суточное регулирование стока, перераспределение годового стока, сокращение стока наносов — ведущие факторы усиления размыва берегов и горизонтальных деформаций в целом.

Примером неблагоприятного развития процессов размыва берегов являются участки р. Волги и Шексны ниже Рыбинского водохранилища, где возникла крайне тяжелая ситуация. Анализ этих процессов и их прогноз показал, что капитальное берегоукрепление — единственный способ обезопасить приречные территории и расположенные на них строения и коммуникации. Вместе с тем, очень важным является внедрение системы мониторинга берегов.

Мониторинг береговой черты Рыбинска должен включать в себя комплексные гидрологические и геоморфологические наблюдения (которые могут сочетаться с гидрогеологическими и инженерно-геологическими работами), повторяемые с определенной периодичностью как на незакрепленных участках берегов, так и в районе вновь созданных и уже действующих берегоукрепительных сооружений.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания “Эволюция и трансформация эрозионно-русловых систем в условиях изменения природной среды и антропогенных нагрузок”, № АААА-А16-116032810084-0.

Acknowledgments. Present paper — is a part of governmental program “Evolution of transformation of fluvial network under condition of environmental change and anthropogenic pressure”, No. АААА-А16-116032810084-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чалов Р. С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
2. Shields F. D., Simon A., and Steffen L. J. Reservoir effects on downstream river channel migration // Environmental Conservation. 2000. Vol. 27. P. 54–66.
3. Krasnoshchekov S. Yu. Determining lateral river channel activity with respect to safety of pipeline crossings // University of Southampton, faculty of engineering, science & mathematics, School of Geography. 2009. 218 p.
4. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Смищенко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 272 с.
5. Рекомендации по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилищ для строительства. ПНИИИС Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1987. 200 с.
6. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
7. Баровский Н. А. Оценка условий формирования свободно меандрирующих рек на разных стадиях их развития // География и природные ресурсы. 2007. № 4. С. 124–130.
8. Маккавеев Н. И., Хмелева Н. В., Гун Го-юань. Свободные меандры // Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. Вып. II. С. 25–62.
9. Замышляев В. И. Сравнение двух формул скорости размыва берега излучины // Тр. ГГИ. 1987. Вып. 307. С. 27–33.
10. Rutherford I. Some human impacts on Australian stream channel morphology // River Management: The Australasian Experience. Chichester, John Wiley & Sons, 2000. P. 2–52.
11. Walker M. and Rutherford I. An approach to predicting rates of bend migration in meandering alluvial streams // Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Adelaide: 1999. P. 659–665.
12. Завадский А. С., Беркович К. М., Чалова А. С., Чернов А. В. Современные условия формирования русел рек бассейна Урала (в пределах России) // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 18. М.: Географический факультет МГУ, 2012. С. 180–205.
13. Hooge J. M. Magnitude and distribution of rates of river bank erosion // Earth Surface Processes and Landforms. 1980. Vol. 5. P. 143–157.
14. Беркович К. М., Власов Б. Н. Особенности русловых процессов на реках Нечерноземной зоны РСФСР // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1982. № 3. С. 28–34.
15. Глушков В. Г. Морфология речного русла // Труды I Всерос. гидрологич. съезда. Л.: 1925. С. 286–290.
16. Luo Haichao. Fluvial processes u regulation of Zhenyang reach in the lower Yangtze River // Selected papers on sedimentation and river engineering. Wuhan: 1990. P. 141–149.
17. Алтунин С. Т. Регулирование русел. М.: Сельхозгиз, 1956. 336 с.

18. Ikeda S., Parker G., and Sawai K. Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development // *J. Fluid Mech.* 112. 1981. P. 363–377.
19. Constantine C. R., Dunne T., and Hanson G. J. Examining the physical meaning of the bank erosion coefficient used in meander migration modeling // *Geomorphology.* 2009. 106. P. 242–252
20. Carson M. A. and Kirkby M. J. Hillslope. Form and Process // *Cambridge Geographical Studies.* 1972. No. 3. 476 p.
21. Chitale S. V. Shape and mobility of river meanders // *Pros. XIX JAHR Congress, sub. A.* 1980. Vol. 2. P. 281–286.
22. Simon A. Adjustment and recovery of unstable alluvial channels // *Earth surface processes and landforms.* 1995. Vol. 20. P. 611–628.
23. Simon A. and Rinaldi M. Disturbance, stream incision, and channel evolution: The roles of excess transport capacity and boundary materials in controlling channel response // *Geomorphology.* 2006. Vol. 79. P. 361–383.
24. Беркович К. М. Русловые процессы на реках в сферах влияния водохранилищ. М.: Геофак МГУ, 2012. 163 с.
25. Методические указания по оценке влияния гидротехнических сооружений на окружающую среду. РД 153-34.2-02.409-2003, СПб: ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” и ОАО “Ленгидропроект”, 2004. 163 с.
26. Williams G. P. and Wolman M. G. Downstream effects of dams on alluvial rivers // *US Geological Survey professional paper* 1286. 1984. 83 p.
27. Серебряков А. В. Русловые процессы на судоходных реках с зарегулированным стоком. М.: Транспорт, 1970. 125 с.
28. Тимофеева В. В. Русловые процессы Нижнего Дона и их антропогенные изменения. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2007. 26 с.
29. Sankey J. B., Ralston B. E., Grams P. E., and Cagney L. E. Riparian vegetation, Colorado River, and climate: Five decades of spatiotemporal dynamics in the Grand Canyon with river regulation // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2015. 120. P. 1532–1547.
30. Дегтярев В. В. Изменение гидрологического режима Иртыша // *Речной транспорт.* 1968. № 12. С. 39–40.
31. Simon A. and Hupp C. R. Channel widening characteristics and bank slope development // *U. S. Geological Survey Water Supply Paper.* 2290. 1986. P. 113–126.

REFERENCES

1. Chalov R. S. *Ruslovedenie: teoria, geografia, praktika* (Channel science: theory, geography, practice). Vol. 1. М.: Izd-vo LKI (Publ.), 2008. 608 p.
2. Shields F. D., Simon A., and Steffen L. J. Reservoir effects on downstream river channel migration. *Environmental Conservation.* 2000. Vol. 27. P. 54–66.
3. Krasnoshchekov S. Yu. Determining lateral river channel activity with respect to safety of pipeline crossings. University of Southampton, faculty of engineering, science & mathematics, *School of Geography.* 2009. 218 p.
4. Kondratiev N. E., Popov I. V., and Snishchenko B. F. *Osnovy gidromorfologicheskoy teorii ruslovogo processa* (The basis of hydro morphologic channel processes theory) L.: Gidrometeoizdat (Publ.), 1982. 272 p.
5. *Rekomendacii po ocenke i prognozu razmyva beregov ravninnykh rek i vodohranilishch dlya stroitelstva* (Recommendation on assessment and prediction of riverbank erosion in rivers of plains and reservoirs for construction). PNIIS. М.: Stroyizdat (Publ.), 1987.
6. Makkaveyev N. I. *Ruslo reki i erozya v ee bassejne* (Riverbed and erosion within its watershed). М.: AN SSSR (Publ.), 1955. 347 p.
7. Barovskiy N. A. Formation conditions assessment of freely meandering rivers on various stages of their evolution. *Geogr. Prir. Resur.* 2007. No. 4. P. 124–130. (in Russ.)
8. *Eksperimentalnaia geomorfologia. Vyp. II* (Experimental geomorphology. Iss. II). Izd-vo Mos. Univ., 1969. 178 p.
9. Zamyshliaev V. I. Comparison of two formulae of meander bank erosion rate. *Tr. GGI.* Iss. 307. 1987. P. 27–33. (in Russ.)

10. Rutherford I. Some human impacts on Australian stream channel morphology. *River Management: The Australasian Experience*. Chichester, John Wiley & Sons. 2000. P. 2–52.
11. Walker M. and Rutherford I. An approach to predicting rates of bend migration in meandering alluvial streams. *Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Adelaide*, 1999. P. 659–665.
12. Zavadskij A. S., Berkovich K. M., Chalova A. S., and Chernov A. V. Ural basin river channels formation present conditions (within Russia borders), in *Erozya pochv i ruslovyie processy* (Soil erosion and channel processes). Iss. 18. M.: Geogr. Fak. MGU (Publ.), 2012. P. 180–205.
13. Hooke J. M. Magnitude and distribution of rates of river bank erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*. 1980. Vol. 5. P. 143–157.
14. Berkovich K. M. and Vlasov B. N. Channel processes characteristic in rivers of non-chernozem zone of Russia Federal Republic. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 5. Geogr.* 1982. No. 3. P. 28–34. (in Russ.)
15. Glushkov V. G. River channel morphology, in *Trudy I Vseros. Gidrologicheskogo s'ezda* (1-st All Russia's hydrological congress proc.). Leningrad. 1925. P. 286–290.
16. Luo Haichao. Fluvial processes u regulation of Zhenyang reach in the lower Yangtze River. *Selected papers on sedimentation and river engineering*. Wuhan, 1990. P. 141–149
17. Altunin S. T. Regulirovanie rusel (Riverbed regulation). M.: Selhhozgiz, 1956. 336 p.
18. Ikeda S., Parker G., and Sawai K. Bend theory of river meanders. Part 1. *Linear development*. *J. Fluid Mech.* 112. 1981. P. 363–377.
19. Constantine C. R., Dunne T., and Hanson G. J. Examining the physical meaning of the bank erosion coefficient used in meander migration modeling. *Geomorphology*. 2009. No. 106. P. 242–252.
20. Carson M. A. and Kirkby M. J. *Hillslope form and process*. Cambridge University Press. 1972. 476 p.
21. Chitale S. V. Shape and mobility of river meanders. *Pros. XIX JAHR Congress*. Sub. A. 1980. Vol. 2. P. 281–286.
22. Simon A. Adjustment and recovery of unstable alluvial channels. *Earth surface processes and landforms*. 1995. Vol. 20. P. 611–628.
23. Simon A. and Rinaldi M. Disturbance, stream incision, and channel evolution: The roles of excess transport capacity and boundary materials in controlling channel response. *Geomorphology*. 2006. No. 79. P. 361–383.
24. Berkovich K. M. *Ruslovyie processy na rekach v sferach vliania vodohranilishch* (Riverbed processes in rivers influenced by reservoirs). M: Geogr. Fak. MGU (Publ.), 2012. 163 p.
25. *Metodicheskie ukazania po ocenke vliania gidrotehnicheskikh sooruzhenij na orruzhajushchuiu sredu* (Guidelines on assessment of hydraulic structures impact to environment). SPb.: VNIIG im. Vedeneyeva i Lengidroproekt, 2004. 163 p.
26. Williams G. P. and Wolman M. G. Downstream effects of dams on alluvial rivers. *US Geological Survey. Professional paper 1286*. US Government Printing Office, Washington DC, USA, 1984. 83 p.
27. Serebriakov A. V. *Ruslovyie processy na sudochodnykh rekach s zaregulirovannym stokom* (Channel processes in regulated navigable rivers). M: Izd-vo Transport (Publ.), 1970. 125 p.
28. Timofeeva V. V. *Ruslovyie processy nizhnego Dona i ih antropogennyye izmeneniya* (Lower Don River channel processes and their anthropogenic alteration). PhD thesis. Moscow: MGU (Publ.), 2007. 26 p.
29. Sankey J. B., Ralston B. E., Grams P. E., and Cagney L. E. Riparian vegetation, Colorado River, and climate: Five decades of spatiotemporal dynamics in the Grand Canyon with river regulation. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2015. No. 120. P. 1532–1547.
30. Degtiarev V. V. Irtysh River hydrological regime change, in *Rechnoj transport* (River Transport). 1968. No. 12. P. 39–40.
31. Simon A. and Hupp C. R. Channel widening characteristics and bank slope development. *U. S. Geological Survey Water Supply Paper. 2290*. 1986. P. 113–126.