

жений по эпюрам глубинного распределения  $^{137}\text{Cs}$ , приурочены к периоду наибольшей распашки и интенсивной химизации сельского хозяйства (конец 1950х – начало 1960х гг.).

Для аллювиальных почв днищ балок, как и для поймы главной долины, характерны значительно более контрастная латеральная и внутрипрофильная дифференциация подвижных (в основном, сорбированных) форм тяжелых металлов и As, чем валовых. При этом большинство тяжелых металлов в балочных почвах накапливаются более интенсивно ( $\text{Cu}_{2,14} > \text{Zn}_{2,65} > \text{Co}_{2,68} > \text{Pb}_{2,72} > \text{Mn}_{3,22} > \text{As}_{3,73} > \text{Fe}_{4,58}$ ), чем в пойменных ( $\text{Co}_{1,07} > \text{Zn}_{1,46} > \text{Pb}_{1,52} > \text{Mn}_{2,16} > \text{Fe}_{2,78} > \text{As}_{13,1}$ ). В то же время, почвы эродируемых частей распаханых водосборных склонов существенно обеднены большинством исследуемых элементов ( $\text{Mn}_{0,67} > \text{Co}_{0,74} > \text{Pb}_{0,79} > \text{Cd}_{0,8} > \text{Cu}_{0,8}$ ). Таким образом, на текущий момент именно овражно-балочную сеть верховий бассейна р. Черни можно рассматривать в качестве главной зоны аккумуляции сорбированных частицами наносов химических элементов. В целом, выявленная картина распределения исследуемых элементов между элементами агроландшафтно-геоморфологической структуры бассейна свидетельствует в пользу значимой роли эрозионно-аккумулятивных процессов в их внутриводосборном перераспределении.

**Э.И. Михневич, В.Е. Левкевич**

*Белорусский Национальный технический университет*

## **ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ РУСЕЛ РЕК И БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ**

В Беларуси эксплуатируется значительное количество водохозяйственных объектов, в состав которых входит комплекс сооружений, обеспечивающих их функционирование. В результате эксплуатации регулируемых русел рек происходит развитие деформаций русел и неукрепленных берегов водохранилищ.

Наблюдения за русловыми процессами в песчаных руслах регулируемых рек-водоприемников показали, что после стабилизации они принимают динамически устойчивое состояние, при котором имеют место лишь незначительные обратимые деформации вследствие изменчивости русловых микро- и мезоформ по гидрологическим периодам, но при этом основные параметры русла (ширина по верху  $B$  и средняя по глубине  $H_c = \omega/B$ ) сохраняются и соответственно обеспечивается заданная пропускная способность. Морфометрический параметр русла  $B/H_c$  формируется в зависимости от гидравлических характеристик потока и свойств грунта, слагающего ложе русла, и возрастает со снижением его размывоустойчивости и увеличением размывающей силы потока. Как ранее было показано [Михневич, 1988, 2008], этот параметр тем больше, чем меньше критерий устойчивости русла, определяемый по формуле:

$$\eta_y = \frac{P_s}{\tau} = \frac{g\rho_1 df + c_p}{g\rho_B H_c I} \quad (1)$$

где  $P_s$  – показатель прочности грунта;

$$P_s = g\rho_1 df + c_p; \quad (2)$$

$\tau$  – удельная влекущая сила потока;  $\tau = \rho_b H_c I$ ;  $\rho_b, \rho_1$  – плотность воды и грунта, взвешенного водой, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – расчетный диаметр зерен грунта, м;  $f$  – коэффициент внутреннего трения грунта в воде;  $c_p$  – удельное сцепление грунта в воде;  $H_c, I$  – средняя по сечению глубина (м) и уклон руслоформирующего потока (русло работает полным сечением). Для расчета параметров динамически устойчивых русел предлагается гидравлико-морфометрический метод, который основан на совместном решении уравнений устойчивости и пропускной способности. Морфометрическое уравнение устойчивости составлено исходя из данных натуральных исследований, показывающих, что отношение ширины русла по верху  $B$  к его средней глубине  $H_c$  есть величина обратно пропорциональная критерию устойчивости русла:

$$\frac{B}{H_c} = \lambda_c \frac{g\rho_b H_c I}{P_s}, \quad (3)$$

где  $\lambda_c$  – коэффициент пропорциональности, называемый в дальнейшем коэффициентом стабилизации русла. В качестве уравнения пропускной способности русла используется формула Шези, в которой гидравлический радиус выражен через  $H_c$ :

$$Q = \omega v = B H_c v = C B H_c^{1.5} I^{0.5} \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (3) и (4) относительно  $H_c$ , а затем  $B$ , после преобразований получаем морфометрические зависимости вида:

$$B = I^{1/7} \left( \frac{Q}{C} \right)^{4/7} \left( \frac{g\lambda_c \rho_b}{P_s} \right)^{3/7} \quad (5)$$

$$H_c = \frac{1}{I^{3/7}} \left( \frac{Q P_s}{\lambda_c g \rho_b C} \right)^{2/7}, \quad (6)$$

где  $Q, I$  – расход (м<sup>3</sup>/с) и уклон руслоформирующего потока;  $C$  – коэффициент Шези, определяемый по формуле Павловского или приближенно по зависимости А.Д. Альтшуля и У-Вин-Тейна. Принимая показатель степени  $y = 0,2$  (среднее значение для регулированных рек), можно выразить параметры  $B$  и  $H_c$  непосредственно через коэффициент шероховатости  $n$ :

$$B = I^{0,189} (Qn)^{0,540} \left( \frac{\lambda_c g \rho_b}{P_s} \right)^{0,460}; \quad (7)$$

$$H_c = \frac{1}{I^{0,405}} \left( \frac{Qn P_s}{\lambda_c g \rho_b} \right)^{0,270}; \quad (8)$$

$$\frac{B}{H_c} = I^{0,594} (Qn)^{0,270} \left( \frac{\lambda_c g \rho_b}{P_s} \right)^{0,730} \quad (9)$$

Среднее значение коэффициента стабилизации  $\lambda_c$  найдено нами в результате обследования стабилизированных участков русел рек-водоприемников с рас-

ходом воды  $Q=20\dots 100 \text{ м}^3/\text{с}$ , проложенных в песчаных грунтах:  $\lambda_c = 7,6$  при использовании в качестве расчетного диаметра  $d=d_{85}$  (крупная фракция отмытки) и  $\lambda_c = 5,0$  при  $d=d_{50}$  (средняя крупность частиц грунта). По опытным данным и приближенно принятым характеристикам грунтов для естественных рек получено среднее значение  $\lambda_c = 17,5$  (при  $d=d_{50}$ ). Коэффициент стабилизации русла  $\lambda_c$  – это интегральная характеристика. Величина этого коэффициента зависит от соотношения между критерием устойчивости  $\eta_y$  и русловым параметром  $B/H_c$ , который в свою очередь формируется под влиянием различных факторов, объединенных общими признаками для данной группы водотоков. Так, для регулированных рек-водоприемников – это, прежде всего прямолинейность русел, подобие гидрологического режима, условий руслоформирования и характера его изменчивости по сезонам года при прохождении паводковых (в том числе руслоформирующих) и меженных расходов. В ряде случаев возникает вопрос об отыскании значения максимального уклона, который можно допускать при использовании морфометрических зависимостей такого вида. За максимально допустимый уклон, очевидно, можно принимать такой, при котором русло достигает предельного динамического равновесия и с превышением его приходит в состояние плановой неустойчивости, т.е. в русле будет начинаться процесс мандрирования. В русловой гидравлике установлено, что такому состоянию соответствует скорость воды, примерно в  $1,8\dots 2,0$  раза превышающая допускаемую неразмывающую  $v_{н.доп}$ . Другим обоснованным критерием предельной плановой устойчивости русла является максимально допустимая в данных грунтовых условиях величина руслового параметра  $(B/H_c)_{доп}$ :

$$\frac{B}{H_c} \leq \left( \frac{B}{H_c} \right)_{доп} \quad (10)$$

где  $B/H_c$  определяется по зависимости (9), а  $(B/H_c)_{доп}$  по формуле:

$$\left( \frac{B}{H_c} \right)_{доп} = \frac{0,16 \cdot C \cdot \sqrt{H_c}}{v_{н.доп}}, \quad (11)$$

где  $v_{н.доп}$  – допускаемая неразмывающая скорость, которую рассчитывают по разработанной нами зависимости:

$$v_{н.доп} = 2,06 \cdot \left( \frac{R}{d} \right)^{0,167} \sqrt{\frac{n_y}{\rho_s} P_s}, \quad (12)$$

где  $R$  – гидравлический радиус русла, м, который может быть принят для рек  $R = H_c$ ;  $n_y$  – коэффициент условий работы, учитывающий наличие взвешенных наносов; при содержании наносов менее  $0,1 \text{ кг/м}^3$   $n_y = 1$ ; при содержании наносов  $S \geq 0,1 \text{ кг/м}^2$   $n_y = 1 + 2S$ .

При решении задачи оценки динамической устойчивости берегов в русловых сильнопроточных водохранилищах следует учитывать активную роль распределения максимальных скоростей, которые приурочены к старому затопленному руслу реки. Это связано с тем, что в построении полей скоростей участвуют как стоковые, так и вдольбереговые течения, возникающие в результате развития ветро-волновых процессов. Для моделирования стоковых течений с

целью оценки устойчивости береговых склонов использовалась математическая модель движения воды в водоёмах с учетом распределения скоростей в прибрежной зоне. Для описания скоростной структуры жидкости в русловом водохранилище применялась плановая (двухмерная) математическая модель, которая получается из классической формализации уравнения Навье-Стокса [Левкевич В.Е. и др., 2015) путем интегрирования уравнений трехмерной задачи по  $z$ -вертикальной координате, т.е. по глубине водоема:

$$U(x, y) = \int_0^h u(x, y, z) dz / h$$

$$V(x, y) = \int_0^h v(x, y, z) dz / h$$

$$P(x, y) = \int_0^h p(x, y, z) dz / h$$

В результате интегрирования имеем уравнение сохранения импульсов

$$h\rho U U_x + h\rho V U_y + P_x + \alpha F(h)U - \gamma(hU)_{xx} - \gamma(hU)_{yy} = 0 \quad (13)$$

$$h\rho U V_x + h\rho V V_y + P_y + \alpha F(h)V - \gamma(hV)_{xx} - \gamma(hV)_{yy} = 0$$

где  $F(h)$  может иметь вид  $1 = \text{const}$  для простейшего случая моделирования,  $n(n+1)/h$  – для степенного закона распределения скоростей, по глубине потока (водохранилища). Уравнение неразрывности (сплошности) потока приобретает форму вида:

$$(hU)_x + (hV)_y = 0 \quad (14)$$

Принималось, что скорости движения воды в русловом водохранилище  $U$  и  $V$  направлены по осям  $X$  и  $Y$ . Для разностной аппроксимации уравнений в частных производных используется прямоугольная, неравномерная сетка  $(X_i, Y_j)$   $i=1,2..N_x$ ,  $j=1,2..N_y$ , где шаги сетки задаются условиями:  $dX_i = X_i - X_{i+1}$ ;  $dX_{i+1} = X_{i+1} - X_i$  и т.п. Формирование скоростной структуры гидродинамического потока в русловом водохранилище на базе плановой модели (13)-(14) определяется взаимодействием трех силовых факторов:

- инерционных (кинематических) характеристик движущейся жидкости, которые задаются первыми двумя членами в каждом из уравнений (13) и (14);
- диссипативных, трение вызванное взаимодействием жидкости и дна водоема, описываемое четвертыми членами уравнений (13) и (14),
- диссипативных, трение, вызванное взаимодействием жидкости и береговой кромки (уреза воды) водоема, которое описывается последними членами уравнений (13) и (14).

Были выполнены расчеты распределения скоростей внутриводоемных течений с построением карт изолиний. Параллельно на физической модели опытного водоема в лабораторных условиях выполнялось моделирование распреде-

ления скоростей. Анализ результатов компьютерного моделирования распределения скоростей и данных лабораторных модельных экспериментов показал их полную идентичность. Проведенные натурные измерения скоростей стоковых и внутриводоёмных течений по тестовому водохранилищу также подтверждают данные численного и физического моделирования. В натуральных условиях на участках акватории водоема, где наблюдается наибольшая концентрация линий равных скоростей - происходит разрушение берегового склона, что подтверждается данными натурных обследований побережья. Размыв склонов вызван воздействием, как ветроволновых течений (поперечное распределение скоростей), так и вдольбереговых, что подтверждают результаты лабораторного моделирования. Таким образом, показано, что рассмотренная численная модель распределения скоростей является реальным инструментом для проведения прогнозной оценки возможной переработки береговых склонов водохранилища на стадии проектирования гидроузла. Следует отметить, что разработанная модель может быть применима для водохранилищ только лишь руслового типа, где присутствуют вдольбереговые стоковые течения и режим эксплуатации водоема близок к русловому. Практическая апробация расчета скоростной структуры стоковых течений и определения потенциальных участков размыва берегов с выдачей рекомендаций по их креплению была выполнена для водохранилища строящейся ГЭС на реке Западная Двина в районе г. Витебска.

<sup>1</sup>Н.Н. Назаров, <sup>1</sup>С.В. Копытов, <sup>2</sup>А.В. Чернов

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский университет;

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

## **МЕЖБАССЕЙНОВЫЕ, ВНУТРИБАССЕЙНОВЫЕ И ВНУТРИДОЛИННЫЕ ПЕРЕСТРОЙКИ РЕЧНОЙ СЕТИ СЕВЕРНОГО ПРЕДУРАЛЬЯ В ПОЗДНЕЛЕДНИКОВЬЕ И ГОЛОЦЕНЕ**

Период окончания четвертичной ледниковой эпохи, а также ранний и средний голоцен отличались изменениями многих природных характеристик даже в тех регионах, куда ледник непосредственно не наступал. Перигляциальные условия сменялись зональными, объёмы стока рек увеличивались при таянии находящихся на удалении ледников, а затем уменьшались, сокращались площади, занятые вечной мерзлотой. Наиболее остро эти изменения проявлялись вблизи природных границ, не зависящих от климата – как правило, орографических, выступающих в роли климаторазделов; высокая изменчивость современного тектонического режима в горах и предгорьях вызывает частую смену направленности и темпов развития продольных профилей рек и их отражения в горизонтальных русловых деформациях.

Северное и Центральное Предуралье – один из предгорных регионов, в котором отмечается обостренная реакция гидрологических и морфодинамических характеристик рек на колебания климата разного масштаба. Покровные оледенения не затронули его - границы и московского и валдайских ледников отклонялись к северо-востоку, к среднему и нижнему течению Печоры, не достигая