

Н.И. Алексеевский, М.А. Самохин

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
УРОВНЕЙ ВОДЫ В РУСЛАХ РЕК¹**

N.I. Alekseevsky, M.A. Samokhin

**THE SPACE-TIME VARIABILITY OF THE WATER LEVELS
IN THE RIVER CHANNELS**

Выполнено исследование пространственно-временной изменчивости уровней воды на участках рек. Обосновано уравнение, характеризующее изменение наполнения русла водой под влиянием комплекса процессов, а также вариацию отметок свободной поверхности по длине и ширине русла реки. Проведено разложение уровня воды на генетические составляющие. Проведён анализ временной изменчивости вклада стока воды, нагонов, заторов, русловых деформаций и других процессов в динамику отметок поверхности воды в произвольном створе реки. Оценён вклад некоторых из этих процессов в формирование уровней наполнения русла Сухоны в районе г. Великий Устюг.

The study of spatio-temporal variability of water levels on sites of the rivers is executed. It the equation is proved describing change of a channel filling by water under influence of processes complex, and also a variation of free surface marks on length and width of river channel. Decomposition of water level on genetic components is carried out. The analysis of time variability of water runoff, setups (run-ups), ice jams, channel deformations and other processes contribution to dynamics of water level marks in any river range is made. The contribution of some of these processes to formation of the Sukhona channel filling levels in the area of Great Ustiug town is estimated.

Уровень воды H испытывает большую пространственно-временную изменчивость вследствие комплексного воздействия разных факторов на наполнение русла реки водой. На произвольном участке реки уровень воды $H = H(x, y, z, t)$, где x, y, z – соответственно продольная, поперечная и местная координаты, t – время. Независимо от типа реки, морфологии русла и долины поступление и перемещение воды от истока к устью сопровождается последовательным снижением осредненной по ширине потока отметки поверхности воды в зависимости от координаты x . Изменение уровней воды по ширине водотока характеризует координата y . Оно связано с деформациями свободной поверхности воды под влиянием поперечных течений на поворотах русла, ветровых нагонов. Координата z дает представление об изменении высоты расположения поверхности воды в конкретной точке русла реки. Она отражает влияние на уровень воды крупных форм руслового рельефа, островов, вызывающих продольное и поперечное изменение этой характеристики. Кроме

¹ Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 06-05-64099).

того, она учитывает изменение уровня, вызванное изменением гидравлического состояния потока, эволюцией вихревых турбулентных образований [Алексеевский, 2005 и др.].

Отметка свободной поверхности в конкретной точке поперечного сечения русла реки i и в момент времени t отражает ее положение относительно отметки поверхности дна ζ и плоскости сравнения равно $\psi = \psi(x)$ (рис. 1). Разность $\Delta = \zeta - \psi$ характеризует превышение средней отметки поверхности дна на конкретном участке реки над условной плоскостью сравнения. Поскольку $H(x, y, z, t) - \zeta(x, y, z, t) = h(x, y, z, t)$, где h – глубина потока, то уровни воды на любом участке реки зависят от факторов, влияющих на изменчивость отметок ζ и глубины потока h . Их разнообразие учитывает уравнение водной поверхности:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{d(\xi + h)}{dt} = \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial t} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial t} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right). \quad (1)$$

Набор основных процессов и интенсивность их влияния на высотное положение уровня воды в русле реки характеризуют скорости изменения отметок дна ζ и глубины h во времени t и по координатам x (вдоль потока), y (по его ширине). Важно заметить, что приращение h может отличаться от соответствующего приращения отметок дна ζ . Поэтому величина $\partial x/\partial t$ и $\partial y/\partial t$ учитывает отличия скоростей изменения h и ζ по соответствующим координатам. Соответствующие значения скоростей равны c_1, c_2, c_3 и c_4 . Их учет для установившегося движения воды позволяет трансформировать уравнение (1) к виду:

$$\frac{dH}{dt} = \left[\frac{\partial \xi}{\partial t} + c_1 \frac{\partial \xi}{\partial x} + c_2 \frac{\partial \xi}{\partial y} \right] + \left[c_3 \frac{\partial h}{\partial x} + c_4 \frac{\partial h}{\partial y} \right]. \quad (2)$$

Составляющая $\frac{\partial \xi}{\partial t}$ характеризует вклад русловых деформаций в изменение уровней воды. В произвольном поперечном сечении любой реки они характеризуют влияние направленных и периодических переформирований русла на изменение высотного положения поверхности воды и дна относительно выбранной плоскости сравнения.

Для неустойчивого русла реки величина c_1 соответствует скорости смещения фронта эрозии или аккумуляции. Эти процессы вызывают изменение уровней воды ($Q = \text{const}$) вследствие направленных общих русловых деформаций [Беркович, 2000]. Величина c_2 характеризует скорость поперечного изменения отметок водной поверхности под влиянием морфодинамического типа русла и руслового рельефа. По мере увеличения относительной ширины потока уменьшается относительная изменчивость отметок дна в пределах поперечного сечения $\partial \xi/\partial y$ и скорость c_2 . Она достигает максимума на участках

относительно прямолинейных и меандрирующих малых рек. Одновременно возрастает роль вертикальных переформирований и снижается значимость горизонтальных деформаций русел рек в изменении высотного положения водной поверхности ($Q = \text{const}$).

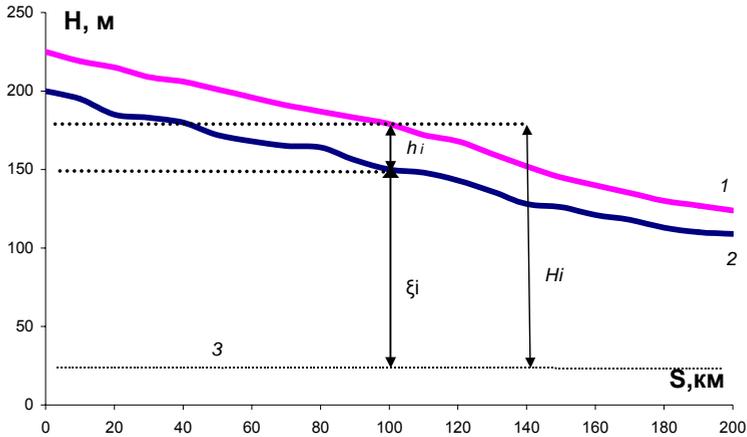


Рис. 1. Изменение отметок поверхности воды (H_j , 1), глубины потока (h_j), отметок дна (ξ_j , 2) по длине реки (3 – плоскость сравнения).

При неустановившемся движении воды $\frac{\partial h}{\partial t} \neq 0$ по длине рек перемещаются волны половодья, паводков или попусков, скорость которых равна c_3 . Их движение дает приращение отметок водной поверхности [Грушевский, 1982 и др.] Изменение глубины потока по длине рек (при $Q = \text{const}$) отражает условия формирования кривых спада или подпора водной поверхности вследствие изменения общего или местного базиса эрозии, подпорного взаимодействия рек, заторов, продольного изменения морфологии русла и долины водотоков. Их совместное или раздельное воздействие на уклоны водной поверхности учитывается в уравнении (2) величиной c_3 и продольного градиента глубины потока.

Величина c_4 при этом характеризует изменчивость глубины потока по ширине рек, характеризующую форму поперечного сечения русла, степень выраженности поперечного уклона водной поверхности. В вершинах излучин горных и полугорных рек она достигает максимума [Караушев, 1969 и др.].

В реальных условиях изменение отметок свободной поверхности определено некоторой совокупностью главных факторов. Сочетание этих факторов изменяется в зависимости от природной зоны, в которой формируется речной сток, орографических особенностей территории, типа внутрigoдового распре-

деления стока, размера рек, морфодинамического типа русла и его морфологических особенностей, наличия или отсутствия водохранилищ, типа регулирования стока. Поэтому исключительно важно знать и учитывать различные механизмы формирования изменений уровней воды [Алексеевский..., 2003]. Если все эти механизмы действуют одновременно, то для произвольного участка реки и момента времени

$$H = H_1 + H_2 + \dots + H_n, \quad (3)$$

где H_n – некоторый фактор изменения уровня воды.

С учетом нормирования всех членов уравнения (3) на H получаем, что

$$1 = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n, \quad (4)$$

здесь α_n – коэффициент генетической значимости процесса n , отражающий вклад этого процесса в наполнение русла водой.

В общем случае $-1 \leq \alpha_i \leq 1$, а $\sum_{i=1}^M \alpha_i = 1$. Увеличение или уменьшение

этих коэффициентов характеризует абсолютную и относительную роль конкретных причин повышения или понижения отметок свободной поверхности.

Для периода $T > 50 - 100$ лет на отметки водной поверхности влияют даже такие процессы, как тектоническая нестабильность территории и уплотнение речных отложений. Скорость тектонических движений очень мала, поэтому их воздействие на изменчивость уровней воды прослеживается лишь на больших интервалах времени. Влияние уплотнения отложений на режим уровней также носит длительный характер и сопровождается постепенным снижением отметок водной поверхности. Наиболее значительный эффект этот процесс имеет в устьях рек [Михайлов, 2002 и др.]. Для $T \leq 1$ год доминирующее воздействие на изменение уровня воды оказывает ритмика поступления воды с речного бассейна. При $T \ll 1$ года роль этого фактора сохраняется, но кратковременно может возрастать роль изменений отметок свободной поверхности, обусловленная заторами, нагонами, приливами, попусками воды и т.п. Если $T \geq 1$ год, то колебания отметок поверхности воды связаны в значительной мере с многолетней изменчивостью стока, тенденциями направленных вертикальных и горизонтальных деформаций русла.

Поступление воды в русловую сеть является важнейшим, постоянно действующим фактором изменения уровней воды. Генетическая значимость колебаний притока воды на участок реки $0 < \alpha_o \leq 1$. Роль этого механизма изменений уровня максимально ярко характеризует функция $H = f(Q)$. Для устойчивых участков рек и при отсутствии поймы между этими переменными существует однозначная связь. Вид зависимости $H = f(Q)$ определен морфологией русла и долины [Барышников, 1978]. Характер данной функции для русел рек с треугольной, параболической и прямоугольной формой передает

степенная функция, параметры которой соответственно равны 0,85; 0,50; 0,27 (α_1) и 0,35; 0,41; 0,56 (α_2). При $Q = 10 \text{ м}^3/\text{с}$ уровень воды в треугольном русле больше на 47 % по сравнению с отметками свободной поверхности в русле прямоугольного сечения. $H = \alpha_{2i} Q^{\alpha_2}$

В среднем многолетнем осреднении уровенный режим рек обусловлен исключительно ритмикой поступления воды с территории их бассейнов. Районы с одним типом уровенного режима подобны по соотношению между максимальным и минимальным уровнями воды (H_{\max} / H_{\min}), а также по сезонам формирования максимальных уровней воды. На территории России существуют 36 таких районов, объединяемых в 7 групп. Признаком группы является сезон года, в котором с наибольшей вероятностью наблюдаются максимальные уровни. Внутри группы районы отличаются продолжительностью и устойчивостью периодов высоких и низких значений уровней воды. Осредненные по районам соотношения H_{\max} / H_{\min} для рек России изменяются в пределах от 3 до 10. Отдельные районы характеризуются экстремально высокими внутригодовыми амплитудами уровня воды. К ним в первую очередь относятся пересыхающие и перемерзающие реки, для которых в течение определенного периода генетическая значимость стокового фактора $\alpha_Q = 0$.

Наибольшее распространение имеют районы, реки которых имеют максимум уровней в период прохождения весеннего половодья (Европейская территория России, Западная и Восточная Сибирь). Для данного типа уровенного режима характерно превышение максимальных уровней над меженными уровнями в 5 – 10 раз. Периоды пониженных уровней прерываются локальными повышениями в период паводков. В целом географические закономерности распространения уровенного режима определены климатическими и орографическими факторами, влияющими на изменение составляющих водного баланса, размером реки. Разность между экстремальными уровнями воды ΔH за многолетний период времени нелинейным образом зависит, в частности, от порядка реки N или площади водосбора F . Так, для разветвленных русел рек Бурятии диапазон (см) изменения уровней воды

$$\Delta H = 0,04 F + 160. \quad (5)$$

На реках Вологодской обл. параметры эмпирической зависимости $\Delta H = \kappa_1 N^{k_2}$, соответственно равны 127 (k_1) и 1,48 (k_2), а для рек Тверской области: 167 и 1,37.

На участках широкопойменного русла генетическая роль притока воды с бассейна зависит от процессов берегового регулирования стока [Всеволожский, 1991]. Пойма и толща отложений обладают емкостью для накопления воды в период максимального стока. За счет перевода части стока воды в толщу водовмещающих грунтов снижаются экстремально высокие уровни воды. Наоборот, на спаде паводочных уровней и в период межени подземных

водоносных горизонтов обеспечиваются относительно высокие уровни воды в реках. При отсутствии поймы и напорной фильтрации (прочие условия равны) максимальные уровни воды могут быть на 5 – 15 % выше по сравнению с участками широкопойменных рек. Генетическая роль разгрузки подземных вод в период межени для большинства рек страны близка к 1.

Значительную часть года стоковые изменения уровня воды дополняются флуктуациями отметок водной поверхности, вызванные неравномерным или неустановившемся движением потока. Неравномерность движения воды вызывает изменения $\partial H / \partial x$ вследствие изменения морфологии русла и поймы, наличия внутриводной растительности и т.п. Так, например, чередование плесов и перекатов формирует локальные участки подпора и спада водной поверхности. Генетическая значимость изменения уровня воды, вызываемого этими факторами, составляет первые проценты и изменяется в зависимости от фазы водного режима. Она уменьшается при увеличении размера реки. Для малых рек значительными могут быть коэффициенты генетической значимости повышений отметок водной поверхности, обусловленных зарастанием русла.

Прохождение волн перемещения вызывает повышение или понижение отметок водной поверхности по длине реки. Обратная положительная волна (при $Q = \text{const}$), например, обеспечивает дополнительное (к стоковому) повышение уровня воды в локальном створе. Стоковые уровни при этом уменьшаются. Генетическое значение волн перемещения в изменении уровней воды может быть постоянным, периодическим или не периодическим (редким). В приливных устьях рек коэффициент генетической значимости приливов α_{eb} изменяется от 0 до 80 % и более в период малой воды. Максимальный уровень формируется как сумма стокового и приливногo: $H_{\text{max}} = H_{\text{сток}} + \Delta H_{\text{прил}}$. Генетическую значимость приливной волны определяет соотношение:

$$\alpha_{eb} = \Delta H_{\text{прил}} / H_{\text{max}} = 1 - H_{\text{сток}} / H_{\text{max}}. \quad (6)$$

Аналогично изменяется генетическая значимость воздействия на уровни воды волн отлива. Так, например, для р. Хунтами (Дальний Восток) α_{eb} изменяется в диапазоне 35 – 45 %, α_{ebo} – 32 – 40 %. Генетическая значимость этого процесса в изменении уровней воды уменьшается по мере удалении от морского края дельты. Влияние приливов на колебания уровней воды зависит от морфологии устья реки. Оно максимально в устье Пенжины (Михайлов, 1997), где оно превышает 6 м. В эти моменты времени α_{eb} превышает 90 %.

В неприливных устьях рек воздействие нагонов относительно кратковременно. В многолетних масштабах времени их роль в колебаниях уровней воды стремится к нулю. В синоптических же масштабах времени коэффициент генетической значимости нагонов α_s может приближаться к 1, что соответствует резкому снижению значимости притока воды с речного бассейна. За период инструментальных наблюдений нагонные повышения отметок поверх-

ности воды в устье р. Нева превышали 4,2 м, что соответствует коэффициенту генетической значимости $\alpha_s = 95 \%$.

Для многих рек России характерно кратковременное повышение уровня воды во время заторов. Максимальное заторное приращение уровня установлено для р. Нижняя Тунгуска [Бузин, 2004]. Оно равно 28 м, что соответствует генетической роли затора в период его существования $\alpha_{id} = 76 \%$. Формирование затора сопровождается с увеличением H , не связанным с возрастанием Q . Так, для р. Малая Северная Двина характерны практически ежегодные заторные явления продолжительностью 1 – 10 дней. Генетическая значимость заторного повышения уровня воды изменяется от 0 до 54 %. На р. Ижма (с. Усть-Ухта) величина α_{id} изменяется от 10 до 35 %, причем влияние этого процесса на вариацию отметок воды ограничено одной неделей в году.

Длительное влияние на уровни воды в руслах рек оказывают однонаправленные русловые деформации. Размыв и понижение отметок дна приводит к их снижению ($Q = \text{const}$). Направленный размыв русел притоков оз. Севан – главный фактор многолетней изменчивости уровней воды, реализующийся на фоне межгодовой и сезонной их стоковой изменчивости. В этом случае генетическая роль деформаций русла в многолетнем изменении свободной поверхности воды стремится к 1, а доля стоковой составляющей приближается к нулю.

Наиболее мощные волны направленных изменений отметок водной поверхности вследствие регрессивной аккумуляции и трансгрессивной эрозии возникают выше и ниже плотин гидроузлов (Беркович, 2000, 2001). При одинаковых расходах воды вклад вертикальных деформаций в изменение уровней воды колеблется от 15 до 44 %. Размыв берегов может обеспечить при этом от 18 до 10 % наполнения русла водой в данный момент времени и в зависимости от продолжительности процесса, расстояния от плотины и морфологического типа русла. Генетическая значимость стока воды при этом колеблется от 76 до 100 %.

Таблица

Соотношение факторов изменения уровней воды р. Сухоны (участок г. Великий Устюг)

Фаза водного режима	Коэффициенты генетической значимости процессов, α_i				
	Приток воды	Затор	Русловые процессы	Береговое регулирование	Подпорное взаимодействие Сухоны и Юга
Подъем волны половодья 1998 г.	54	54	2	-10	0
Спад волны половодья 1967 г.	58	-	-2	-	44
Межень 1967 г.	5	-	2	93	-

Для произвольного участка реки существует особое сочетание факторов (см. таблицу), которое определяет наполнение русла водой в данный момент времени. Это сочетание изменяется во времени и по длине рек. Некоторые из

них действуют постоянно и воздействуют на меженные уровни и уровни в период максимального стока. Другие существуют ограниченное время и могут влиять на наполнение русла водой периодически или случайным образом. Эти закономерности необходимо знать и учитывать при обосновании мер по предупреждению опасных гидрологических процессов. Из таблицы следует, что в отдельные годы максимальные уровни воды в районе г. Великий Устюг формируются практически при равном участии механизмов стокового и заторного изменения уровней. Русловые процессы при этом вносят относительно небольшой вклад в наполнение русла водой в этот период, но они являются спусковым механизмом к образованию заторов и в косвенной форме оказывают существенное влияние на повышение максимальных уровней воды [Алабян, 2004]. Наоборот, береговое регулирование стока их снижает. Подпорное взаимодействие рек Сухоны и Юга имеет существенное значение для уровня режима данного участка Сухоны. Оно возникает при более позднем половодье на р. Юг. Это обуславливает асинхронность воздействия всех механизмов на наполнение русла водой. Что касается межени, то в этот период года может резко возрасти роль берегового регулирования стока.

Литература

1. *Алабян А.М., Алексеевский Н.И., Евсеева Л.С и др.* Генетический анализ причин весеннего затопления долины Малой Северной Двины в районе Великого Устюга // Эрозионные и русловые процессы, 2004, вып. 14, с. 104–130.
2. *Алексеевский Н.И., Акименко Т.А., Круглова Г.В., Самохин М.А.* Генетические составляющие и прогноз уровня воды в р. Оке в период половодья // Тр. Академии проблем водохозяйственных наук, 2003, вып. 11, с. 40–50.
3. *Алексеевский Н.И., Ободовский А.Г., Самохин М.А.* Механизмы изменения уровней воды в реках // Эрозионные и русловые процессы, 2005, вып. 4, с. 216–237.
4. *Барышников Н.Б.* Речные поймы. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 152 с.
5. *Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В.* Экологическое русловедение. – М.: ГЕОС, 2000. – 332 с.
6. *Беркович К.М.* Географический анализ антропогенных изменений русловых процессов. – М.: ГЕОС. 2001. – 164 с.
7. *Бузин В.А.* Заторы льда и заторные наводнения на реках. – СПб.: Гидрометеоздат, 2004. – 203 с.
8. *Всеволожский В.А.* Основы гидрологии. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 351 с.
9. *Грушевский М.С.* Неустановившееся движение воды в реках и каналах. – Л.: Гидрометеоздат, 1982. – 288 с.
10. *Караушев А.В.* Проблемы динамики естественных водных потоков. – Л.: Гидрометеоздат, 1960.
11. *Караушев А.В.* Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – 416 с.
12. *Михайлов В.Н.* Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. – М.: ГЕОС, 1997. – 413 с.
13. *Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В., Иванов А.А., Долженко Н.П.* Современные гидролого-морфологические процессы в устьевой области Кубани / Материалы XVII пленарного межвузовского координационного совещания по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. – Краснодар, 2002.