

УДК 550.341.2

В.К. Балханов, З.И. Хажеева

**МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЧНОГО
РУСЛА В МОДЕЛИ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО
ТЕЧЕНИЯ***

Процессы хозяйственного освоения природных ресурсов распространились на большую часть речных бассейнов. Часто они приводят к ухудшению экологического состояния региона, которое может на многие годы выйти из состояния биологического равновесия. Загрязнение природных вод продуктами ускоренной эрозии на водосборах дополняются физико-химическими и биологическими загрязнениями техногенного воздействия. Для оценки воздействия хозяйственной деятельности на баланс веществ необходимо изучение количественных закономерностей распространения в водном потоке различных загрязняющих субстанций.

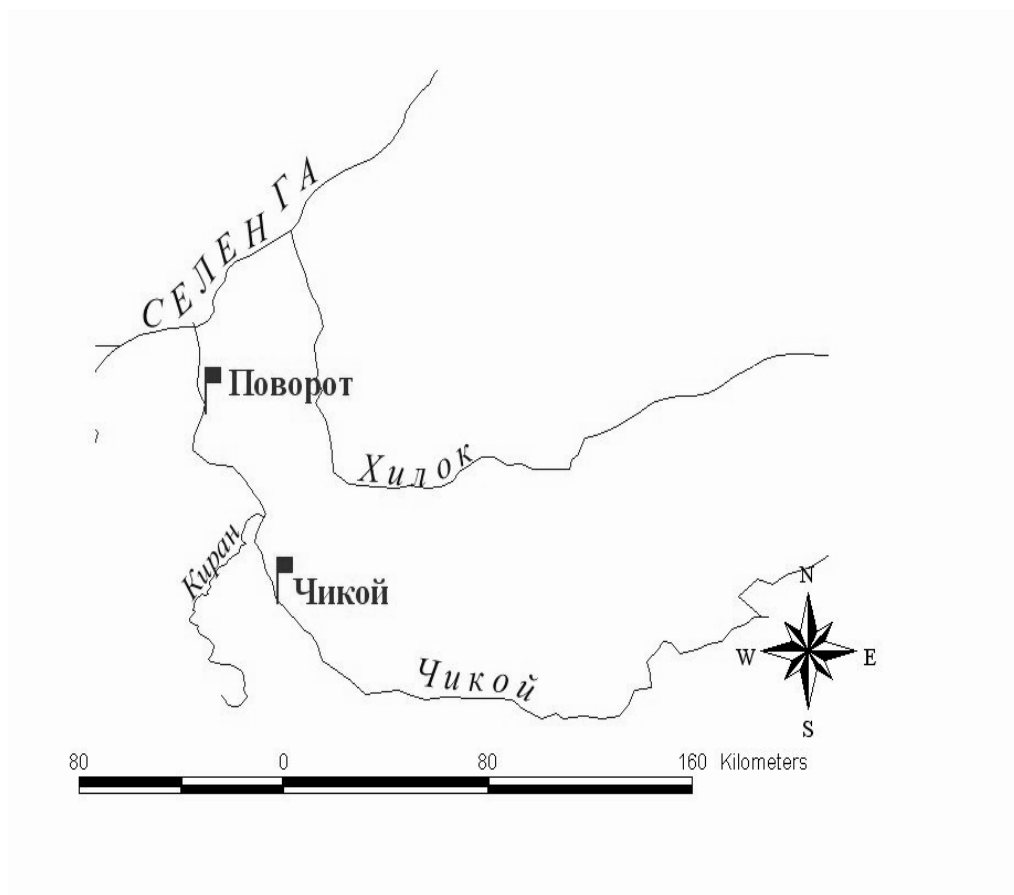
Речной поток практически никогда не бывает представленным одним руслом. Всегда имеются пересекающиеся друг друга сети речных русел. При образовании из двух водных потоков одного изменяются русловые характеристики, загрязнение и минерализация общего водотока. Внутригодовая динамика стока, смена морфодинамического типа русла влияют на изменение экосистемы водных потоков. Оно связано со сложными процессами изменения всех гидравлических и морфометрических ха-

рактеристик системы поток-русло. В частности, динамика стока контролируется вариацией уклонов водной поверхности, скорости течения и глубины потока. Морфометрические параметры водотока влияют на активность водообмена. В свою очередь, водообмен определяет минерализацию, кислотно-щелочные и окислительно-восстановительные условия речного русла [4].

Обычно измеряемыми величинами являются следующие: расход воды Q ($\text{м}^3/\text{с}$), средняя скорость течения реки V ($\text{м}/\text{с}$), концентрация C ($\text{мг}/\text{л}$) растворенного компонента. Течение реки характеризуется шириной H и глубиной h русла, а также перепадом давления ΔP на длине L , которое, собственно, и вызывает само течение. Поэтому представляет интерес выявление связи между регулярно измеряемыми концентрациями компонентов водного массы и характеристиками русла реки.

Цель настоящей работы является установление связи морфометрических параметров русла реки в приближении открытого стационарного потока и сезонной зависимости растворённых компонентов. Изменение морфометрических параметров русла приводит к изменению гидрологических условий, ко-

*Работа частично поддержана грантами РФФИ №№: 05-01-97200, 05-02-97202, 05-05-97279, 05-05-97267.



Гидрографическая схема участка р. Чикой

торые непосредственно влияют на водообмен. Изменение водообмена неминуемо приводит к сдвигу карбонатно-кальциевого равновесия [4]. Расчёты проводятся в приближении плоскопараллельного течения на примере р. Чикой и её притока р. Киран. Между створами с. Поворот (устье р. Чикой) и с. Чикой (верховье) впадает приток реки Киран. Расстояние между створами 140 км (рисунок).

Плоскопараллельное течение

Минерализация вод р. Чикой на створе с. Чикой не превышают 0,1 г/л в течение года. В устье р. Чикой на створе с. Поворот минерализация повышается

на 15-20 %. Отличие по сравнению с р. Чикой вод притока р. Киран является повышенной минерализация (0,25 г/л). Обладая повышенной минерализацией, воды р. Киран являются причиной загрязнения вод р. Чикой. В месте слияния реки и притока, которую назовём ближней зоной, наблюдается ареал загрязнения, который распространяется вниз по течению [1,2]. В результате диффузии и турбулентности область смешения и разбавления речных вод распределяется по всей водной массе и интенсифицирует процесс самоочищения, образуя дальнюю зону. Это обстоятельство позволяет для моделирования характери-

стик русла водного стока использовать двумерную модель течения водной массы без учёта вертикальной составляющей.

При двумерном описании водного потока русло реки ограничим параллельными берегами шириной H . Ось x направим вниз по течению вдоль одного из берегов, а ось y нормально к противоположному берегу. Скорость водного потока направлена вдоль оси x и зависит только от координаты y , т.е. вектор скорости $\vec{V} = (V_x(y), 0, 0)$. В пренебрежении посторонними субстанциями течение воды определяется уравнением Навье – Стокса [3]:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{\eta}{\rho} \nabla^2 \vec{V}. \quad (1)$$

Здесь используются стандартные обозначения: ∇ - оператор Набла, ρ - плотность жидкости (10^3 кг/м^3), η - вязкость воды ($10^{-3} \text{ кг/м}\cdot\text{с}$). Для стационарного двумерного медленного течения воды между двумя плоскими параллельными берегами уравнение Навье – Стокса (1) принимает вид:

$$\frac{d^2 V_x}{d y^2} = -\frac{\Delta P}{\eta L}. \quad (2)$$

Здесь ΔP - перепад давления на длине L . Интегрируя уравнение (2) с учетом естественных граничных условий – обращения в нуль скорости на берегах, получаем

$$V_x(y) = \frac{\Delta P}{2 \eta L} y(H - y). \quad (3)$$

Это известный параболический профиль.

Используя решение (3), найдем среднюю скорость течения реки и расход воды. По определению средних, имеем:

$$V = \frac{1}{H} \int_0^H V_x(y) dy.$$

Подставляя (3) и производя элементарное интегрирование, получаем среднюю скорость:

$$V = \frac{\Delta P}{12 \eta L} H^2. \quad (4)$$

Поток воды $Q = \int V_x(y) dA$, где A – поперечное сечение русла реки. Представим dA как $h dy$, где h – глубина реки, тогда

$$Q = h \int_0^H V_x(y) dy.$$

Подставляя (3), окончательно находим

$$Q = \frac{\Delta P}{12 \eta L} h H^3. \quad (5)$$

Этот результат заменяет известную формулу Пуазейля для течения по трубе [3]. Фактически, результат (5) является первым не исчезающим членом ряда по малому параметру h/H , получающемуся при решении трехмерной задачи течения водной массы.

Используя (4) и (5) можно получить следующую полезную формулу для расхода воды:

$$Q = V h H. \quad (6)$$

Эта формула точная в том смысле, что является определением средней скорости.

Выразим ширину реки и ее глубину через измеряемые величины – расход воды и ее средней скорости. Из (4) сначала находим

$$H = B V^{1/2}, \quad (7)$$

где для краткости записи формул ввели

$$B = \sqrt{12 \eta L / \Delta P},$$

а затем из (6):

Таблица 1
Сезонные характеристики речной сети

Показатели	с. Чикой	приток – р. Киран	с. Поворот
	март		
$V, м/с$	0.32	0.46	0.25
$Q, м^3/с$	20.8	1.48	15.6
H/V	0.56	0.67	0.5
Bh	115	4.7	125
май			
$V, м/с$	0.45	0.7	0.48
$Q, м^3/с$	147	1.57	225
H/V	0.67	0.84	0.69
Bh	487	2.7	676
июль			
$V, м/с$	1.31	0.47	1.2
$Q, м^3/с$	875	2.77	790
H/V	1.14	0.68	1.1
Bh	583	8.6	601
октябрь			
$V, м/с$	1.08	0.49	0.63
$Q, м^3/с$	200	1.59	311
H/V	1.04	0.7	0.79
Bh	178	4.6	622

$$h = \frac{1}{B} Q V^{-3/2}. \quad (8)$$

Проверка формул, полученных в предположении двумерного течения, была проведена для реки Чикой на участке створ с.Поворот- с.Чикой. Результаты расчёта приведены в табл. 1, где строки V и Q – измерения, а H/V и Bh – вычисленные по формулам (7) и (8). Перемножая V , H/V и Bh получаем, согласно (6), расход воды Q , значения которой в целом согласуются с измеренными значениями.

Из анализа табл. 1 следует, например, что зимой и осенью для притока величина Bh равна $4.6 \div 4.7$. Весной уменьшается почти в два раза, до значения 2.7. Од-

нако летом Bh принимает максимальное значение 8.6.

Оценка сезонной зависимости растворённых компонентов

В дальней зоне, где процессы смешения и разбавления не столь существенны, устанавливается стационарный поток, в котором становится возможным пренебречь взаимодействием компонентов водного раствора. В этом случае каждую растворённую компоненту можно рассматривать независимо друг от друга. Это позволяет составить баланс веществ следующим образом.

Если C – концентрация компонента (мг/л), Q – поток жидкости, то число молекул рассматриваемой компоненты, проходящих через поперечное сечение в единицу времени, будет пропорцио-

Таблица 2
Гидрохимическая характеристика речной сети

Компоненты, мг/л	с.Чикой	приток-р. Киран	с.Поворот
март			
Минерализация	105,0	350,1	113,2
Гидрокарбонаты	60,1	237,0	72,1
Кальций	14,4	54,5	17,2
Коэффициенты α , β	23,7	3,3	23,7
май			
Минерализация	65,1	314,0	62,2
Гидрокарбонаты	39,7	201,1	39,2
Кальций	10,2	48,1	9,2
Коэффициенты α , β	102,0	-13,1	102,0
июль			
Минерализация	62,2	296,0	65,4
Гидрокарбонаты	36,2	223,1	38,2
Кальций	9,1	54,9	10,4
Коэффициенты α , β	-383,1	7,6	-383,1
октябрь			
Минерализация	74,1	347,0	67,8
Гидрокарбонаты	48,7	238,0	41,1
Кальций	12,8	55,1	11,6
Коэффициенты α , β	377,1	-22,0	377,1

нально производству CQ . Часть из них будет осаждаться из водного раствора на дно водоема площадью LN , и их число пропорционально концентрации компоненты водного раствора [3]. Таким образом, общее число молекул компоненты будет пропорционально следующему выражению:

$$CQ - \alpha C,$$

где коэффициент α зависит от величины LN . Положительное значение коэффициента α означает, что рассматриваемая компонента осаждается из водного раствора в виде твердого осадка на дно водоема. Отрицательным значениям α будет соответствовать растворение твердого вещества или выщелачивание в результате нарушения термогидродинамического режима течения водного потока.

Верховье р. Чикой обозначим индексом 1, приток – индексом 2, а нижнее устье р. Чикой – индексом 3. Тогда речная система р. Чикой - р. Киран можно описать уравнением

$$\text{река 1} + \text{приток 2} = \text{река 3}.$$

Баланс веществ для водной системы, где в результате смешения генетически разных вод, формируется новый состав воды, будет выглядеть, как

$$C_1 Q_1 - \alpha C_1 + C_2 Q_2 - \beta C_2 = C_3 Q_3 - \alpha C_3 \quad (9)$$

Аналогично коэффициенту α , коэффициент β учитывает осаждение или растворение твердой фазы для бокового притока. Поскольку взаимодействием всех компонент мы пренебрегаем, то коэффициенты α и β

будут одинаковы для всех растворённых компонент. Для учёта сезонной зависимости коэффициентов α и β воспользуемся результатами режимных наблюдений, представленных в таб. 2. В результате расчетов получим значения коэффициентов α и β , приведенные в табл. 2.

Введенные коэффициенты α и β зависят от характеристик русловой сети. Полученные коэффициенты учитывают процессы осаждения или растворения в водном растворе речного русла. По знаку коэффициента α можно заключить, что осенью, зимой и весной в речной воде преобладают процессы осаждения, а летом отмечается выщелачивание, что приводит к повышению минерализации состава водной массы речной воды. Для коэффициента β видно, что его величина периодически меняет знак. Зимой и летом твердые вещества в притоке (р. Киран) осаждаются, а весной и осенью растворяются в результате процессов выщелачивания. По абсолютной величине коэффициентов α и β можно судить об интенсивности процессов осаждения и растворения.

Заключение

Впервые предложена двумерная модель течения рек, позволяющая

связать характеристики русла (ширина, глубина) с измеряемыми величинами (средняя скорость, расходы). Установлено, что по измерению концентраций растворённых компонент можно судить о процессах осаждения и растворения в природном водном растворе, находящемся в равновесии с твердыми веществами.

Растворимость химического элемента в природной воде может быть рассчитана, если известна активность всех растворённых компонент, находящихся в равновесии с устойчивой твердой фазой, и если можно определить отношение активностей растворенных компонент к их концентрации. При наличии соответствующих термодимических данных можно рассчитать активности всех известных компонент раствора. Но пока расчёты, с помощью которых пытаются перекинуть мостик от состава раствора к активностям компонент, определяющих этот состав, пока является скорее искусством, зависящим от опыта, общих знаний и интуиции.

В предлагаемой работе процессы осаждения и растворения в результате выщелачивания оцениваются на основе молекулярной модели не взаимодействующих частиц. Несомненно, что такая грубая оценка имеет прикладное значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов Б.В., Котеров В.Н., Кочерова А.С., Солбаков В.В., Хублярян Г.М. Расчет распространения взвешенных веществ в прибрежной области моря // Водные ресурсы, 2004. Т.31. № 1. С. 31-39.
2. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. – М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. 736 с.
4. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. 366 с.

Коротко об авторах

Балханов Василий Карлович – младший научный сотрудник, отдел физических проблем БНЦ СО РАН,
Хажеева Зинаида Ивановна – кандидат физико-математических наук, Байкальский институт природопользования СО РАН.