

УДК 556.551

МАЛЫЕ РЕКИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕРРИТОРИИ¹© 2003 г. Н. И. Алексеевский*, С. О. Гриневский*, П. В. Ефремов*,
М. Б. Заславская*, И. Л. Григорьева***Московский государственный университет
119992 Москва, Ленинские горы**Институт водных проблем Российской академии наук
119991 Москва ГСП-1, ул. Губкина, 3

Поступила в редакцию 0.6.03.2002 г.

На основе полевых обследований малых рек Московской и Тверской областей дана оценка антропогенных нагрузок на их водосборы. Выполнена экспертная оценка влияния этих нагрузок на состояние поверхностных вод. Обоснованы интегральные признаки и критерии подобию гидроэкологического состояния малых рек.

Состояние малых рек можно рассматривать в качестве индикатора изменения геоэкологической обстановки различающихся размерами территорий. Вследствие многочисленности эти реки создают систему координат, в которой наиболее целесообразно осуществлять общий геоэкологический мониторинг природно-техногенной среды. При этом наблюдения организуются не в каждой точке этой системы, а в ограниченном числе створов по длине подобных (имеющих своеобразный территориальный набор географических, геологических, гидрологических, химических, биологических и других признаков подобию) рек. Анализ мониторинговых наблюдений создаст условия ранней диагностики негативных изменений геоэкологической обстановки на этих территориях.

Использование малых рек в качестве индикаторов экологической напряженности затруднено их малой изученностью. Единственный вариант получения необходимой информации о малых водотоках – полевое обследование достаточного числа этих водных объектов и обобщение полученных материалов с целью выделения рек, отличающихся наиболее сильными индикативными свойствами. Для этого необходимо обосновать достаточно полный набор характеристик гидрогеологического, гидрологического, гидрохимического, гидробиологического и руслового режимов водотоков, позволяющий оценить их фоновое состояние и степень его изменения. Ключевое значение при этом имеет их увязка с речным стоком (РС), или геосток, и изменением состояния рек.

¹ Исследования выполнены при финансовой поддержке ФЦП “Университеты России – фундаментальные науки” (проект 8.6.1) и РФФИ (грант 00-05-64120).

ГЕОСТОК И ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ РЕК

В широком смысле РС – это совокупность стока воды W_Q , наносов W_{RG} , растворенных веществ W_D [3, 7]. По-видимому, эту совокупность целесообразно дополнять микробиологическим стоком W_{MB} , поскольку перемещение многих видов водных организмов происходит по длине речных систем совместно с водой [1, 5]. Следовательно,

$$PC = W_Q + W_{RG} + W_D + W_{MB},$$

где РС характеризует суммарный объем веществ различного генезиса в русловой сети. Она изменяется под влиянием трансформации стока тепла W_T кинетической энергии водных потоков P_{QN} . К вклад в пространственно-временную изменчивость РС зависит от W_Q и размера (порядка) N реки. Внутрисезонные, сезонные и многолетние характеристики вещественных и энергетических потоков отражают состояние и интегральную реакцию территориально-аквальных систем на изменение природных факторов в соответствующих масштабах времени или с некоторым сдвигом во времени dt . Чем больше N , тем больше dt .

В произвольном створе речной сети РС включает в себя две составляющие: естественную PC_e и антропогенную PC_a , т.е.

$$PC = PC_e + PC_a.$$

Характеристики естественных составляющих потока вещества и энергии – количественные признаки природного состояния речных бассейнов. Различные ($s = 1, 2, \dots, M_s$) природопользователи вносят некоторый вклад в изменение РС, и P_{QN} . Поэтому

$$PC = \sum_{s=1}^M PC_s,$$

$$PN = f(W, P_{QN}) \sum_{s=1}^M PN_s,$$

где PN – изменение составляющих PC под влиянием изменения стока W и кинетической энергии водных потоков. В конкретных условиях число природопользователей M может отличаться от среднерегионального. Поэтому для каждой реки величины PC и PN имеют особый (отличительный) смысл.

Естественный сток воды зависит от природных условий, соотношения поверхностного и подземного источников питания рек. Эти составляющие стока различаются концентрациями в воде химических и взвешенных частиц, биологических субстанций, а также температурами, другими потребительскими свойствами. Природопользование непосредственно или косвенно влияет на поток вещества и энергии в русловой сети. Тип и масштабы этого влияния характеризуют загрязнение (изменение) природной среды. Оно прослеживается в физическом, химическом и биологическом изменении состояния рек. Физическое загрязнение водных объектов обусловлено изъятием стока или его искусственным увеличением, изменением содержания в воде взвешенных минеральных частиц (наносов), температуры и кинетической энергии водных потоков. Химические аспекты загрязнения характеризуют повышенное поступление в русловую сеть соответствующих видов поллютантов – производных хозяйственного использования или преобразования компонентов природных ландшафтов, растительного и почвенного покрова территории, поступления разнообразных видов сточных вод. На биологическом загрязнении отражается антропогенное воздействие на концентрацию в компонентах природных ландшафтов опасных для здоровья населения микроорганизмов, изменение состава и продуктивности водных биоценозов.

Совокупность указанных и некоторых других изменений состояния рек можно трактовать как нарушение гидроэкологической безопасности территории [3]. Оно проявляется в дефиците водных ресурсов, угнетении или деградации водных экосистем, увеличении вероятности и опасности наводнений, русловых деформаций, негативного изменения здоровья населения, водных экосистем, снижении качества воды. Характер этих последствий наиболее быстро проявляется в территориально-аквальных комплексах малых рек и зависит от конкретного сочетания причин, вызывающих негативное изменение их состояния.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы результаты выполненного в 1998 г. МГУ и ИВП РАН обследования 19 рек Московской и Тверской областей. Эти реки расположены на юге лесной зоны, в близких климатических условиях. Большая часть водотоков – притоки р. Москвы. В Тверской обл. изучены боковые притоки Иваньковского водохранилища, а также р. Куновка – приток р. Дубны. Длина ~60% изученных водных объектов составляет 10–20 км, 30% – 21–40 км и 10% – более 40 км. Эти объекты относятся к малым рекам. Площадь их водосборов изменяется от 37.5 до 755 км². Минимальный порядок рек [5] оказался равным 2, а максимальный – 5.8. Водотоки различаются условиями зарегулированности стока. Повышенное число озер и прудов отмечается в бассейнах рек Иночи, Сетуни, Островни, Дойбицы и Донховки. Средние высота и уклоны рек в бассейне р. Москвы соответственно равны 190–240 м абс. и 1.4–1.8‰. Уклоны рек Тверской обл. близки к 0.37‰. Эти реки характеризуются меньшей высотой бассейнов (~130 м абс.) и повышенной заболоченностью.

Район исследований расположен в зоне умеренно-континентального климата и находится под воздействием атлантических и арктических воздушных масс. Средний слой осадков составляет 700–800 мм, что соответствует условиям достаточного увлажнения, слой годового стока – 200–250 мм. Зональный модуль стока близок к 7 л/(с км²). Доли поверхностного и подземного источников питания рек составляют соответственно 67–75 и 33–25% годового стока. Характерные расходы воды – возрастающая функция площади речных бассейнов.

Все изученные реки имеют восточно-европейский тип внутригодового распределения стока. Основная фаза водного режима – весеннее половодье. За период половодья проходит > 50% годового стока. Средняя продолжительность половодья составляет 1–2 месяца. Минимальный сток отмечается летом и зимой. Летне-осенние паводки, при которых расходы воды превышают расходы воды в период половодья, наблюдаются почти ежегодно.

Эти реки подобны по условиям формирования стока взвешенных наносов, поскольку входят в зону, для которой величина модуля стока взвешенных наносов $M_R = 8$ т/(км² год). Среднегодовая мутность речных вод составляет 100–250 г/м³. Весной формируется 90–95 и 75–80% годового стока взвешенных наносов рек Московской и Тверской областей соответственно.

Химический состав речных вод зависит от сочетания генетических типов вод, поступающих в их русла в различные периоды года. Во время половодья русловая сеть занята в основном поверхностно-склоновыми водами гидрокарбонатно-кальциевого состава (минерализация 100–200 мг/л). Эти воды

отличаются пониженными значениями рН (7.4–7.6) и пониженным относительным содержанием гидрокарбонат-ионов за счет повышения доли сульфат-ионов, вымываемых из верхних горизонтов почв и лесной подстилки. В них представлено много органических веществ. Химическое потребление кислорода (ХПК), или бихроматная окисляемость (БО), составляет 20–30 мг О/л, а отношение перманганатной окисляемости (ПО) к БО – 0.40–0.50.

Воды почвенно-грунтового происхождения доминируют в составе русловых вод в переходный (от половодья к межени) период года. Минерализация воды возрастает до 200–300 мг/л. В составе растворенных веществ преобладают гидрокарбонаты кальция. Содержание органических веществ в воде заметно снижается.

Во время устойчивой летней и зимней межени минерализация возрастает до 600 мг/л, БО = 10–20 мг О/л и ПО/БО = 0.30–0.40. В макрокомпонентном химическом составе вод явно доминируют HCO_3^- и Ca^{2+} . Среднегодовое значение модуля ионного стока составляет 40–50 т/км².

Реки Московской обл. дренируют надморенный водоносный горизонт четвертичных осадков ($f, lg Q_{IV}$) и карбонатные породы каширского и подольско-мячковского водоносных горизонтов (C_{2-3}). Коэффициенты фильтрации водовмещающих пород первого водоносного комплекса в среднем составляют 0.6–1.0 м/сут. Напорные воды этого горизонта используются для местного водоснабжения. Модуль подземного водоотбора составляет 0.1–0.5 л/(с км²). Минерализация гидрокарбонатно-кальциевых, гидрокарбонатно-кальциево-магниевого вод водоносного комплекса колеблется от 300 до 450 мг/л. Модуль подземного стока $M_{II} = 1.5–2.6$ л/(с км²). Норма слоя подземного стока равна 70 мм. Коэффициент подземного стока составляет 30–35%.

Ниже москворецких водохранилищ поверхность бассейнов отличается пониженной проницаемостью (коэффициент фильтрации $k_f < 0.001$ м/сут). Сток некоторых рек (Молодежня, Нахавня, Дубешня) формируется в результате дренирования флювиогляциальных межморенных (fQ_{IIms}), флювиогляциальных и озерно-ледниковых подморенных отложений ($f, lg Q_I prk - Q_{IIms}$). В нижнем течении они дренируют также водоносные горизонты каменноугольного возраста. Глубина залегания грунтовых вод (ГВ) в горизонте fQ_{IIms} изменяется от 4–6 до 10 м, $k_f = 2–15$ м/сут. Воды горизонта гидрокарбонатно-кальциевые, натриевые. Минерализация ГВ колеблется от 500 до 700 мг/л. Водоносный горизонт ($f, lg Q_I prk - Q_{IIms}$) располагается в 16–19 м от дневной поверхности, $k_f \leq 1$ м/сут. Общая минерализация гидрокарбонатно-кальци-

евых и кальциево-магниевого вод < 500 мг/л, $M_{II} = 1.3–2.7$ л/(с км²). Слой подземного стока достигает 75 мм. Подземное питание формирует 40% годового стока рек.

В Тверской обл. условия формирования подземного стока более разнообразны. Здесь выделяются следующие водоносные горизонты: временный болотный hQ_{IV} , который приурочен к междуречью рек Сучка и Донховки; современный аллювиальный aQ_{IV} , который дренируется в долинах всех исследуемых рек; верхнечетвертичный озерно-аллювиальный водоносный горизонт laQ_{III} , который распространен в устье р. Дойбицы; верхнечетвертичный аллювиальный водоносный горизонт aQ_{III} , характерный для нижнего течения р. Сучка; надморенный флювиогляциальный водоносный горизонт fQ_{IIms} , типичный почти для всей площади речных бассейнов; горизонт спорадического проявления московской морены gQ_{IIms} ; московско-днепровский аллювиально-флювиогляциальный водоносный горизонт $aQ_{Iidn-ms}$, характеризующийся сплошным распространением. Также встречаются водонесущие горизонты верхнего (клязьминско-ассельский $C_2ci - P_1a$) и среднего карбона (подольско-мячковский горизонт, $C_2pd - mc$)

Глубина залегания ГВ в горизонте hQ_{IV} и fQ_{IIms} 0.5–2 м; в aQ_{IV} и gQ_{IIms} – 1–3 м; в laQ_{III} – 1–5 м; в aQ_{III} – 1–7 м. Для торфов $k_f = 0.002–2.2$ м/сут. Для других горизонтов значения k_f весьма различны. В зависимости от водовмещающих пород $k_f = 0.01–16$ м/сут. Болотные воды обычно слабокислые, гидрокарбонатно-сульфатные кальциево-магниевого, содержащие повышенное количество железа (2–3 мг/л). Воды остальных горизонтов в основном гидрокарбонатные кальциево-магниевого с минерализацией 100–500 мг/л. Горизонт $aQ_{Iidn-ms}$ приурочен к межморенным отложениям на глубине 25–40 м. Водовмещающие породы представлены в основном мелко- и среднезернистыми песками. Мощность водоносного горизонта до 2 м, $k_f = 5–8$ м/сут. Воды горизонта гидрокарбонатно-кальциево-магниевого с общей минерализацией 200–900 мг/л.

Отложения верхнего карбона приурочены к тонкозернистым известнякам, реже доломитам, глубина залегания горизонтов изменяется от 15 до 60 м, величина напора составляет 10–30 м. Воды относятся к гидрокарбонатно-кальциевым, кальциево-магниевого (минерализация ≤ 1.0 г/л). Мощность подольско-мячковского горизонта 80–90 м. Область питания расположена к западу от г. Твери, где отложения C_2 залегают под четвертичными отложениями. Воды здесь сульфатно-гидрокарбонатные магниево-кальциевые с общей жесткостью 6–12 мг экв/л, $M_{II} = 0.6–2.5$ л/(с км²). Слой подземного стока равен 75 мм. Доля подземного питания мал-

Таблица 1. Характеристика видов и масштабов влияния антропогенных нагрузок на поверхностные и подземные воды (α_n – залесенность территории; α_p – степень распаханности территории; r – инженерное преобразование ландшафтов (селитебность); s – жизнедеятельность населения (плотность населения))

Нагрузки на поверхность водосбора и водные объекты							
Река	α_n , %	α_p , %	r , %	s , чел/км ²	Водозабор, тыс. м ³ /год, из		Водоотведение, тыс. м ³ /год
					горизонтов ГВ и подземных вод*	малых рек	
Московская обл.							
Зароченка	89	6	~0	14	0/0	0	<1
Замошня	80	10	~0	14	~0/0	0	<1
Песочня	61	20	~0	14	~0/0	0	<1
Иночь	60	20	6.7	14	~0/270	~0	50
Малая Иночь	10	43	7.1	14	~0/110	~0	50
Лусянка	28	34	6.2	14	~0/0	0	<1
Жезлянка	25	35	6.2	14	~0/0	0	<1
Москва (Барсуки)	46	20	2.8	14	~0/34000	9420	21960
Сетунь	50	17	5.2	90	~0/6020	~0	5430
Островня	80	17	1.1	70	550/1700	~0	87
Наховня	59	20	~0	69	550/0	~0	<1
Сторожка	70	16	~0	58	0/0	0	<1
Молодельня	60	11	1.3	30	550/1700	~0	60
Дубешня	50	8	~0	20	550/1700	~0	6
Тверская обл.							
Куновка	50	5	4.4	90	~0/3686	~0	3325
Инюха	17.5	16.7	16.7	30	~0/440	~0	~0
Сучок	64	20.4	9.1	30	~0/482	~0	~0
Дойбица	49.9	29.1	13.1	22	~0	~0	1825
Донховка	44.3	11.8	13.4	278	~0	1576	438

* В числителе – ГВ, в знаменателе – подземные воды.

рек изменяется от 35–40 (р. Куновка) до 25–35% (реки Дойбица, Сучок и др.).

ХАРАКТЕРИСТИКА АНТРОПОГЕННЫХ НАГРУЗОК НА МАЛЫЕ РЕКИ

Качество воды (КВ) исследованных рек связано с рассмотренными выше природными факторами и антропогенными нагрузками, поскольку $KB = KB_e + KB_a$ и

$$KB_a = KB_1 + KB_2 + \dots + KB_L,$$

где L – число видов антропогенных нагрузок. Составляющие правой части этого уравнения отражают вклад конкретного вида природопользования в изменение естественного уровня потребительских свойств водных ресурсов территории. Антропогенные нагрузки на реки Московской и Тверской областей (табл. 1) включают в себя водозабор из рек и подземных водоносных горизонтов, сброс в водные объекты промышленных, сельско-

хозяйственных и коммунально-бытовых сточных вод, сведение лесов, распашку земель, инженерное преобразование природных ландшафтов при градостроительстве, создание социальной инфраструктуры и т.д. Для оценки влияния хозяйственной деятельности на состояние малых рек использована система экспертных баллов.

Прямой водозабор из рек, за исключением рек Москвы и Донховки, относительно мал (0 баллов). Доля изымаемой при этом воды не превышает 5% годового их стока (1 балл). Более существенны объемы использования подземных вод, которые лишь в редких случаях дренируются малыми водотоками. Объемы использования подземных вод достигают 34.0 млн. м³/год. Максимальное изъятие характерно для р. Москвы (выше Можайского водохранилища). Влияние подземного водоотбора на состояние малых рек в целом мало. Большее значение для этого состояния имеет водозабор из горизонтов ГВ. Отношение объема водозабора ГВ

Таблица 2. Оценка частной и общей антропогенной нагрузки на некоторые малые реки

Река	Антропогенные нагрузки (баллы)								Интенсивность антропогенной нагрузки		
	Сведение лесов	Сельское хозяйство		r	s	Водопотребление		Отведение сточных вод	Б	степень	класс
		земледелие	животноводство			ГВ	речных вод				
Московская обл.											
Зароченка	-1	1	3	1	2	0	0	0	6	Слабая	II
Замошня	-1	1	3	1	2	0	0	0	6	»	II
Песочня	-1	1	3	1	2	0	0	0	6	»	II
Иночь	-1	1	3	2	2	0	0	2	9	»	II
Малая Иночь	1	3	3	2	2	0	0	2	13	Умеренная	III
Лусьянка	1	2	3	2	2	0	0	0	10	Слабая	II
Жезлянка	1	2	3	2	2	0	0	0	10	»	II
Москва (Барсуки)	-1	1	3	1	2	0	1	2	9	»	II
Сетунь	-1	1	3	2	4	0	0	5	14	Умеренная	III
Островня	-1	1	3	1	4	1	0	5	14	»	III
Наховня	-1	1	3	1	4	1	0	0	9	Слабая	II
Сторожка	-1	1	3	1	4	0	0	0	8	»	II
Молодельня	-1	1	3	1	3	1	0	5	13	Умеренная	III
Дубешня	-1	1	3	1	2	1	0	0	7	Слабая	II
Тверская обл.											
Куновка	-1	1	3	1	4	0	0	5	13	Умеренная	III
Инюха	1	1	3	3	3	0	0	0	11	»	III
Сучок	-1	2	3	2	3	0	0	0	9	Слабая	II
Дойбица	-1	2	3	2	2	0	0	3	11	Умеренная	III
Донховка	0	1	3	2	6	0	1	3	16	Значительная	IV

к среднему многолетнему расходу воды (или к общему стоку за период устойчивой межени) <1% (0 баллов). Лишь для четырех рек в Звенигородском р-не эта доля несколько возрастает (1–5%, 1 балл) (табл. 2).

Сброс в реки сточных вод достаточно велик, хотя в некоторые водотоки (Зароченка, Замошня, Песочня и др.) такие воды вообще не поступают. Вклад в антропогенную нагрузку сброса сточных вод оценен с использованием двух показателей [8]: отношения условной приведенной массы загрязняющих веществ (ЗВ), которые поступают в реку со сточными водами, к объему годового стока рек и условного объема сточных вод (с учетом степени очистки), приходящихся на 1 м³ речного стока. Для оценки общей антропогенной нагрузки за счет точечного поступления ЗВ в реку эти показатели переводятся по избранной шкале в баллы, и их значения складываются. Состояние 62.5% малых рек в верховьях р. Москвы практически не зависит от организованного водоотведе-

ния (0 баллов). Притоки р. Москвы в Звенигородском р-не и Ивановского водохранилища, особенно реки Сетунь, Островня, Молодельня, Куновка, Дойбица, Донховка, подвержены влиянию сброса сточных вод в большей степени (от 2 до 5 баллов).

Использование лесных ресурсов влияет на многолетние изменения годового и сезонного стока воды, взвешенных наносов, растворенных веществ. Вырубка лесов и лесовосстановление сопровождаются нарушением зональных особенностей миграции тяжелых металлов вследствие изменения рН почвенных растворов. Влияние этого вида антропогенных нагрузок на малые реки оценить достаточно сложно. Оно может быть учтено в первом приближении на основе балльной оценки их воздействия на геосток. В начале XX в. в Московском регионе $\alpha_n = 45\%$. Это значение α_n может быть принято в качестве фоновое (0 баллов). Экспертная оценка позитивного влияния леса на изменение геостока соответствует – баллу, если $\alpha_n > 45\%$, а негативное воздействие

сведения лесов принимается равным +1 баллу при $\alpha_n < 45\%$. На исследуемой территории лишь у 16% рек $\alpha_n < 45\%$.

Косвенный показатель влияния сельскохозяйственного производства на состояние рек – α_p . Увеличение α_p свидетельствует о негативных изменениях внутригодового распределения стока, возрастании стока взвешенных наносов, повышенном выносе ЗВ в водные объекты. Если для Московской и Тверской областей $\alpha_p \leq 20\%$ территории, то эти значения можно рассматривать в качестве фоновых (1 балл) условий формирования геостока и качества воды. Они соответствуют незначительному изменению характеристик естественных потоков в русловой сети. При $20 < \alpha_p \leq 40$ (2 балла); $40 < \alpha_p \leq 60$ (3 балла); $60 < \alpha_p \leq 80$ (4 балла) и $\alpha_p \leq 80\%$ (5 баллов) отмечается прогрессивно нарастающая нагрузка на бассейны и водотоки территории. Более 70% обследованных рек практически не испытывают влияния, связанного с земледелием. Состояние лишь некоторых из них изменено в процессе преобразования почвенного покрова.

Воздействие животноводства на качество речных вод (кроме организованных стоков с животноводческих ферм, которые учитываются показателями влияния водоотведения) зависит от поголовья скота, приходящегося на 1 км² водосбора [8]. Слабое (<15), незначительное (15–25), значительное (25–40 голов скота/км²) снижение потребительских качеств водных ресурсов под влиянием этого фактора соответствует 1, 2 и 3 баллам антропогенной нагрузки. В бассейнах изученных рек плотность поголовья скота составляет 25–40 животных/км² (3 балла, табл. 2).

Качество воды в реках в значительной мере зависит от плотности населения s , использующего территориальные и рекреационные ресурсы малых водотоков. Чем больше s , тем выше вероятность химического и бактериального загрязнения поверхностных и подземных вод. При $s < 5$ чел/км² (1 балл) гидроэкологическое состояние рек практически не зависит от этого вида антропогенных нагрузок. При $s = 5–24$ чел/км² (2 балла) потребительские свойства водных ресурсов начинают снижаться под влиянием жизнедеятельности населения. Дальнейшее ухудшение ситуации соответствует $s = 25–49$ (3), $50–99$ (4), $100–149$ (5) и >150 чел/км² (6 баллов). Максимальное влияние этого вида антропогенной нагрузки на качество воды характерно для бассейна р. Донховки. Большинство изученных водных объектов отличается низкой плотностью населения ($5–24$ чел/км²).

Сток, качество поверхностных и подземных вод зависят от площади селитебных территорий. Отсутствие населенных пунктов, транспортных сетей соответствует природному фону состояния водосборов (0 баллов). Такие водосборы не вхо-

дили в состав объектов исследования. Относительно малая селитебность ($r \leq 5\%$, 1 балл) свойственна подавляющему большинству изученных речных бассейнов. Отдельные водосборы имеют небольшую (2 балла) селитебность ($r = 6–15\%$). Лишь р. Инюха отличается повышенной селитебностью водосбора ($r = 16–25\%$, 3 балла). Потенциально в обследованных областях имеются водные объекты, для которых характерны условия существенной ($r = 26–45\%$, 4 балла), значительной ($r = 46–65\%$, 5 баллов) и сильной ($r > 65\%$, 6 баллов) селитебности.

Интегральное изменение состояния рек соответствует сумме экспертных баллов (СБ) по каждому виду антропогенных нагрузок (табл. 2). Она изменяется от 6 до 16 баллов. В первом приближении можно считать, что при СБ < 5 антропогенное преобразование состояния этих рек исчезающе мало. Классы слабой, умеренной и значительной антропогенной нагрузки можно выделять при СБ = 5–10; 11–15; 16–20 баллов соответственно. В этом случае 58% изученных рек находятся в условиях слабой, 37% – умеренной и 5% – значительной антропогенной нагрузки.

СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Химическое загрязнение рек оценено по индексу загрязнения (ИЗВ) [6]. Оно обуславливает различие в классах качества воды. Нормированные концентрации загрязняющих веществ в реках бассейна р. Москвы ниже Можайского водохранилища в условиях летней межени свидетельствуют о превышении ПДК_{рх} (по рыбохозяйственному признаку) практически по всем пробам по таким характеристикам качества, как NH₄, Cu, ХПК, цветность (Цв), нефтепродукты (НП). В отдельных пробах такое превышение отмечается и в отношении С и NO₂. Ситуация в целом сохраняется и при учете санитарно-гигиенических норм (табл. 3). Отсутствие превышения ПДК_{сг} по сравнению с ПДК_{рх} по большинству из этих показателей связано с меньшей жесткостью санитарно-гигиенических нормативов. Пространственные неоднородности изменения отдельных характеристик КВ хорошо согласуются с нарастанием антропогенных нагрузок вдоль тракта московского водосточника. В целом воды малых притоков р. Москвы д. с. Барсуки, р. Куновки, малых водотоков в Звенигородском р-не и р. Москвы имеют III–IV класс качества по ИЗВ с использованием ПДК_{сг} (водоем умеренно загрязнен или загрязнен) и лишь водоем в р. Сетуни сильно загрязненная (V класс). Лимитирующими показателями при этом являются НП, NH₄, ХПК и Цв. IV класс качества воды притоков Ивановского водохранилища (реки Инюха, Сучок, Дойбица, Донховка) свидетельствует о наличии мощных механизмов изменения потре-

Таблица 3. Нормированные показатели (с использованием ПДК_{ст}) качества воды р. Москва и ее притоков в период летней межени* (прочерк – здесь и в табл. 4 отсутствие данных)

Река	NO ₂	NO ₃	NH ₄	Fe _{общ}	XПК	Цв.	НП	Cu	Zn	Pb	SO ₄	Cl	M	O ₂	F
Москва (выше г. Можайска)	0.0	0.1	0.6	1.2	1.2	2.7	0.5	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	4.3	0.1
Москва (ниже г. Можайска)	0.0	0.1	0.4	1.2	1.0	2.7	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	2.2	0.1
Искона (устье)	0.0	0.1	1.0	1.9	1.1	2.7	0.6	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.4	4.2	0.1
Руза (устье)	0.0	0.1	0.5	1.3	1.0	1.7	0.6	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	4.2	0.1
Москва (ниже впадения р. Рузы)	0.0	0.1	0.5	1.3	1.0	2.0	0.4	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	1.0	0.1
Москва (выше г. Звенигорода)	0.0	0.1	0.6	1.4	0.8	1.7	0.9	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.8	0.1
Москва (ниже г. Звенигорода)	0.0	0.1	0.5	1.4	0.8	1.7	1.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.9	0.1
Нахавня (устье)	0.0	0.4	1.0	1.8	0.9	2.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.9	0.1
Сетунь (устье)	0.1	0.3	0.7	1.9	1.0	2.0	2.9	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.4	0.8	0.1
Островня (устье)	0.0	0.2	0.9	2.0	0.9	2.0	1.6	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.4	0.8	0.1
Сторожка (устье)	0.0	0.2	0.5	1.9	0.4	1.7	1.5	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.5	0.8	0.1
Молодельня (устье)	0.0	0.1	0.1	1.8	1.0	1.5	2.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.4	–	0.1
Дубешня (устье)	0.0	0.0	0.4	2.0	0.9	1.5	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	–	0.1

* Жирные цифры соответствуют нормированным значениям показателей качества воды.

бительских свойств водных ресурсов. Качество воды, как и в Московской обл., зависит от содержания нефтяных углеводородов, NH₄, органики. Антропогенные нагрузки (табл. 2) на эти реки в целом больше таковых в верховьях р. Москвы. Они дополняются негативным влиянием естественных факторов. Так, поступление большого количества органических веществ из болот на их водосборах оказывает решающее влияние на снижение качества речных вод.

Состояние подземных вод также зависит от сочетания естественных факторов и антропогенных нагрузок. Влияние определяющих условий на состояние подземного водосбора и водоносность малых рек в период межени объясняет высокую пространственную изменчивость значений M_п. В верховьях большинства рек значения меженных характеристик мало отличаются от фоновых значений M_п. В среднем и нижнем течении водотоков эти различия заметно нарастают. Даже при подобии физико-географических условий, влияющих на продольное изменение водоносности рек, они могут различаться по степени дренированности горизонтов ГВ, значениями M_п. Например, значения M_п в бассейне р. Молодельни больше таковых для р. Дубешни и практически в 7 раз превышают региональный фон. Аномально высокое значение M_п коррелирует с общим уменьшением минерализации речной воды. Это свидетельствует о подпитке реки более пресными подземными водами, на что указывает и максимальная доля под-

земного питания р. Молодельни (40–45%). Несколько меньше его доля (35–40%) в стоке рек у Звенигорода. Для большинства же рек территории подземные воды формируют 25–35% годового стока рек (генетическая значимость этого источника питания достигает минимума в бассейне р. Куновки и притоках Иваньковского водохранилища). Изъятие подземных вод не оказывает заметного воздействия на истощение подземных вод (средний модуль водоотбора составляет 7–15% модуля ресурсов подземных вод).

Более существен эффект негативных изменений качества ГВ. Опробование 94 колодцев, девяти родников и трех скважин показало, что максимальные изменения химического состава вод характерны для притоков Иваньковского водохранилища. Они испытывают и относительно больший пресс антропогенных нагрузок (табл. 2). В 17% случаев ГВ (по одному или нескольким показателям КВ) относятся к загрязненным. В них содержание ЗВ достигает ПДК для источников питьевого назначения, а в 27% случаев оно превышает ее. Значительная площадь пашни и селитебных территорий (табл. 2), наличие крупной автомагистрали обуславливают снижение качества воды в колодцах. В бассейне р. Москвы качество ГВ в целом заметно лучше. В верховьях реки к числу незагрязненных водоисточников относится 78% колодцев и родников. В окрестностях Звенигорода (в связи с увеличением антропогенных нагрузок) качество ГВ сни-

жается. Лишь 64% колодцев здесь можно использовать в качестве источников питьевой воды.

Качество подземных вод, содержащихся в отложениях карбона, практически везде соответствует ГОСТ по питьевой воде. Это связано с их хорошей защищенностью, предупреждающей водообмен между верхними и нижними водоносными горизонтами. Исключение составляет ситуация в бассейне р. Инюхи (превышение ПДК соединений азота в воде).

При загрязнении подземных вод (в период межени) снижается качество воды в реках ниже зон разгрузки водоносных горизонтов. Анализ натуральных данных показал, что эффект такого влияния проявляется уже при формировании минерализации речных вод, в изменении фонового содержания в воде соединений азота. Для водотоков в Звенигородском р-не загрязнение соединениями азота полностью определено поступлением последних из верхних горизонтов ГВ.

ЭКОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ РЕК

Гидроэкологическое состояние территории определяется не только негативным изменением объема и качества водных ресурсов. При некоторых условиях оно нарушается, приобретает негативные особенности вследствие опасного изменения интенсивности и направленности массообмена в системе поток-русло или русловых процессов. Эти изменения проявляются в деградации речной сети, отмирании ее мелких элементов, заилении русел рек, опасных размывах дна и берегов и зависят от изменчивости гидравлических и морфометрических характеристик водных потоков, размера рек (N и площадь F). Чем больше N и F , тем больше водоносность рек, их ширина и глубина. Продольная изменчивость скорости водных потоков обратно пропорциональна этим морфометрическим характеристикам, зависящим от морфологии русла.

Идентичность или отличия рек по характеру и интенсивности русловых переформирований можно оценить, если известны критерии подобия вертикальных и горизонтальных деформаций русла, морфодинамического состояния элементов речной сети. Все обследованные водные объекты идентичны по условиям формирования речного стока, типу (восточно-европейского) внутригодового распределения стока. Близкие гидрогеологические условия бассейнов не исключают некоторого различия рек по вкладу подземных источников в формирование речного (особенного межени) стока. Реки заметно различаются размерами и порядком. Этот признак подобия характеризует различия водных объектов по условиям концентрации стока в русловой сети. Чем больше N (при $F = \text{const}$), тем гуще сеть водотоков, дренирующих террито-

рию, выше скорость изменения гидрологических характеристик вдоль главной артерии стока. Для изученных рек $N = 2.0-5.8$ [5]. При одинаковой антропогенной нагрузке на реки $KB \sim 1/N$.

К признакам подобия морфодинамических изменений состояния малых рек нужно отнести морфодинамический тип русла. Он определяет характер продольной изменчивости стока речных наносов. Для участков относительно прямолинейного русла (Π) характерно продольное увеличение стока наносов, соответствующее преобладанию вертикальных деформаций русла, переводу русловых отложений во взвешенное состояние [2] по сравнению с изменением пространственного положения русла (горизонтальными деформациями). Для меандрирующих рек (M) результирующая баланса наносов $dW \cong 0$. Для них приблизительно одинаков результирующий массообмен между потоком и руслом в процессе горизонтальных и вертикальных деформаций. По отношению к изменению объема речных отложений меандрирующие участки русла динамически устойчивы [4]. Наличие разветвленного русла (P) означает, что $dW < 0$. На таких участках рек происходит увеличение объема речных отложений вследствие аккумуляции наносов. Соответствующий морфодинамическому типу русла характер продольного изменения стока наносов определяет различия рек по условиям их самоочищения, изменения концентрации ЗВ по длине и ширине потока.

Малые реки Московской и Тверской областей заметно различаются по морфодинамическому типу русла (табл. 4). При преобладании M в значительной мере представлены и относительно прямолинейные водотоки ($M + \Pi$). Лишь изредка они являются преобладающим типом русла ($\Pi + M$). В большинстве случаев он прослеживается на коротких отрезках рек. Русловые разветвления распространены ограниченно, в комбинациях $\Pi + M + P$, $M + \Pi + P$ или $M + P$.

Гидравлическое подобие исследованных водотоков характеризуется числом Фруда:

$$Fr = V^2/gh,$$

где V и h – средняя скорость и глубина реки. Малая изменчивость числа Фруда свидетельствует о небольших различиях между ними (табл. 3). Они существенны при сопоставлении морфологии дна и русел рек. Отношение ширины русла B к длине характеризует форму поперечного сечения русла. При $N = \text{const}$ увеличение B/h вызывает изменение скорости водных потоков. При уменьшении критерия B_n/h , где B_n – ширина поймы, возникают различия рек по продольному балансу наносов, изменению объема речных отложений, характеру затопления пойм, взаимодействиям пойменных русловых потоков в период максимального стока

Таблица 4. Интегральные признаки и критерии подобию гидроэкологического состояния малых рек

Реки	Зона формирования поверхностного стока	Дренируемый горизонт	Порядок реки	Тип распределения стока	Тип русла	Тип русловых отложений	B/h	$B_{п}/B$	$Fr, V_2/gh$	Класс антропогенных нагрузок	Класс качества воды (по ИЗВ, ПДКст)	Класс состояния
Московская обл.												
Замошня	Лесная	Q_{IV}	2.0	Восточно-европейский	М	п + и	10	9.0	0.04	II	III	3
Песочня	»	Q_{IV}	3.0	То же	М + П	п + г + и	15	2.7	0.02	II	III	2
Иночь	»	$Q_{IV} + C_{2-3}$	4.2	»	П + М + Р	п + и	18	16.0	0.06	II	III	3
Малая Иночь	»	$Q_{IV} + C_{2-3}$	3.9	»	П + М + Р	п + и	16	6.1	0.03	III	III	3
Лусянка	»	Q_{IV}	4.1	»	М + П	п + г	10	13.5	0.09	II	III	1
Москва	»	$Q_{IV} + C_{2-3}$	5.8	»	М + П + Р	и + п	43	20.0	0.09	II	III	2
Сетунь	»	Q_{IV}	3.8	»	П + М	п + и + г	13	2.0	0.02	III	V	3
Островня	»	Q_{IV}	3.6	»	М	п + г + и	14	38.2	0.07	III	IV	2
Наховня	»	Q_{IV}	2.8	»	М + Р	п + и + г	15	22.0	<0.01	II	III	2
Сторожка	»	Q_{IV}	2.3	»	М + П	п + и	40	13.8	0.02	II	IV	3
Молодельня	»	Q_{IV}	2.6	»	М + П	п + г + и	14		0.03	III	IV	2
Дубешня	»	Q_{IV}	3.6	»	М	п + г + и +	14		0.05	II	IV	2
Тверская обл.												
Куновка	»	Q_{IV}	3.7	»	М	и + п + г + т	77	-	0.1	III	III	4
Инюха	»	Q_{IV}	5.5	»	М + П	п + г + и	26	7.1	0.02	III	IV	3
Сучок	»	Q_{IV}	2.8	»	М + П	и + п	53	17.0	0.02	II	IV	3
Дойбица	»	Q_{IV}	4.0	»	М + П	и + п + г	20	23.0	0.02	III	IV	3
Донховка	»	Q_{IV}	4.1	»	М + П	и + п + г	13	65.0	0.01	IV	IV	2

К признакам морфодинамического подобию рек относятся и тип русловых отложений (табл. 4). Преобладание в них гравия и галечно-валунного материала (г), песка (п), ила (и), торфа (т) отражает интегральную реакцию рек на внешние воздействия. Сочетание комбинаций п, г, п + г, г + п означает, что русловой поток способен осуществлять транзит мелких фракций взвеси – продуктов смыва с поверхности водосбора. Наличие участков рек, где при наличии песчаных и гравийно-галечных фракций в составе русловых отложений в большом количестве представлены частицы ила, глины и пыли, указывает на тенденции увеличения объема русловых отложений, заиления рек. Если мелкие фракции преобладают (сочетания и + п + г, и + г + п), то для таких участков рек (или водных объектов) характерно доминирование процессов осадконакопления. В этом случае в отложениях может содержаться и торф. Его наличие подчеркивает существование в верховьях рек болотных массивов или интенсивное отмирание элементов русловой сети.

Обследованные реки по типу русловых отложений делятся на четыре группы. В первую группу входит Лусянка (первый класс состояния). Она практически не обнаруживает признаков заиления, находится в состоянии динамического равновесия [4]. Для ~44% водотоков характерно незначительное преобладание процессов накопления в их руслах минеральных частиц, поступающих с вышерасположенных участков бассейна (второй класс состояния). Приблизительно столько же малых рек испытывает заиление (третий класс состояния). Оно проявляется на участке, длина которого $l \geq 0.5L$, где L – длина водотока. Наиболее высокая степень морфологических изменений показательна для русла р. Куновки (четвертый класс состояния). Они связаны не только с дренированием болотных массивов, но и с мелкоразмерной землей.

Сочетание рассмотренных условий развития водных объектов отражается в изменении состояния водных экосистем. Оно прослеживается в количестве видов простейших в составе фито-

планктона, их численности. Анализ ситуации в верховьях р. Москвы показал, что для большинства малых рек удельная (в 1 л воды) концентрация простейших не превышает 48 экземпляров. Число видов колеблется от 2 до 7. По составу фитопланктона и количеству простейших эти водотоки относятся к категории "чистые". Исключением составляет участок р. Москвы у д. Дровнино, где обильное поступление органики обуславливает огромную численность (460 млн. экз/мл) простейших. Здесь речные воды эвтрофны. Ниже по течению содержание фитопланктона быстро снижается вследствие оздоравливающего воздействия оз. Михалевского.

Численностью и биомассой бентоса также подтверждаются относительно благоприятные условия существования водных экосистем малых рек в верховьях р. Москвы. Число бентосных организмов колеблется от 0 до 250 экземпляров на 1 м² поверхности дна. Биопродуктивность организмов составляет 0–3.1 г/м². Наличие в составе бентоса поденок – прямой признак хорошего экологического состояния водных объектов.

Важным признаком подобия этого состояния можно считать степень зарастаемости русел рек α_3 . Индикация ухудшения (улучшения) ситуации соответствует уменьшению (увеличению) площади русла, занятой высшей водной растительностью. Для изученных в 1998 г. рек $\alpha_3 = 0–70\%$. Минимальная зарастаемость (полное отсутствие водной растительности) характерна для малых рек в верховьях р. Москвы. Исключение составляют реки Иночь и Малая Иночь. На участке р. Иночи у д. Заслонино прикрепленная водная растительность занимает до 70% поверхности дна. На некоторых участках рек Иваньковского водохранилища $\alpha_3 = 20\%$. Большая зарастаемость не всегда служит однозначным признаком возросшего поступления органического вещества в водотоки. В ряде случаев

активное развитие высшей водной растительности наблюдается при относительно малых значениях ИЗВ на участках распластанного потока в условиях заиления русла, естественного или искусственного сокращения водоносности рек.

Таким образом, интегральное состояние малых рек отражает всю совокупность воздействий природных факторов и антропогенных нагрузок, которые проявляются через изменения различных составляющих речного стока. Изучение реакции состояния рек на конкретный фактор должно осуществляться при идентичности всех других признаков и критериев подобия водных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеевский Н.И. Генетический анализ качества воды // География. М.: Изд-во МГУ, 1993. С. 222–228.
2. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 202 с.
3. Алексеевский Н.И., Заславская М.Б., Фролова Н.Л. Гидроэкологические особенности малых рек центра России // Проблемы гидрологии и гидроэкологии. М.: Изд-во МГУ, 1999. Вып. 1. С. 281.
4. Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеониздат, 1977. 271 с.
5. Малые реки Волжского бассейна. М.: Изд-во МГУ, 1998. 234 с.
6. Методические указания по формализованной комплексной оценке качества поверхностных и подземных вод по гидрохимическим показателям. Руководство/Д.: ГХИ, 1988. 28 с.
7. Муравейский С.Д. Реки и озера. Гидробиология. М.: Географиздат, 1960. 388 с.
8. Скорняков В.А. Учет распределения антропогенных факторов и антропогенных нагрузок при оценке качества воды // Проблемы гидрологии и гидроэкологии. М.: Изд-во МГУ, 1999. Вып. 1. С. 238–261.