

УДК 551.482.214

БАЛАНС ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА, БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ИВАНЬКОВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

КАДУКИН А. И., КРАСИНЦЕВА В. В., РОМАНОВА Г. И.,
ТАРАСЕНКО Л. В., ТУРУНИНА Н. В. (ИВП АН СССР)

Вода, поступающая в Ивановское водохранилище, содержит многочисленные неорганические и органические соединения как природного, так и антропогенного происхождения. В результате внутриводоемных процессов качественный и количественный состав их изменяется. Наибольшую роль в этих изменениях играют альгофлора и высшая водная растительность, интенсивность развития которых зависит от поступления в водохранилище питательных веществ. Вследствие синтеза и преобразования органического вещества гидробионтами содержание биогенных элементов и микроэлементов в водохранилище также изменяется. После отмирания и разложения растений поглощенные ими азот, фосфор и микроэлементы частично поступают обратно в воду, а большей частью (в составе органических остатков) захороняются в донных отложениях, откуда при благоприятных условиях переходят сначала в иловые воды, а затем в придонные. Таким образом создается круговорот веществ в водохранилище. Миграция растворенных в воде микроэлементов может нарушаться также вследствие их осаждения в виде малорастворимых соединений или сорбции на взвешенных в воде частицах.

С целью количественной оценки влияния внутриводоемных процессов на состав воды авторами был составлен баланс органического вещества, биогенных элементов и микроэлементов в Ивановском водохранилище.

Баланс органического вещества, азота и фосфора. При составлении приходной части баланса рассматривались органические вещества, поступающие с речным стоком, атмосферными осадками и сточными водами (с учетом городских и сельских населенных пунктов, сельскохозяйственных территорий, животноводческих комплексов, торфоразработок и рекреации), а также в процессе жизнедеятельности альгофлоры, высшей водной растительности и гетеротрофной ассимиляции углекислоты. В расходной части баланса учитывались сток органических веществ через гидросооружения, поглощение их из воды фотосинтетиками, минерализация в толще воды, поступление в донные отложения с детритом, а также изъятие их из водоема в виде полезной продукции.

Расчет поступивших с водосбора органических веществ, азота и фосфора проводился на основании собственных наблюдений и с использованием данных других авторов [3—6, 11—16, 27—29, 32]. Общий объем поступления и убыли веществ рассчитывался на основании среднегодовых показателей содержания компонентов в воде и с учетом расхода воды. Для перехода от кислорода бихроматной окисляемости воды к органическому углероду в расчетах использовался коэффициент 0,375.

В ряде случаев общее содержание органического вещества в воде оценивалось по перманганатной окисляемости, поскольку для верхневолжских вод отношение этой величины к органическому углероду близко единице [29].

При определении поступления загрязняющих веществ из сельских населенных пунктов использовались медико-биологические данные и нормы загрязнения на одного жителя [30, 35]. При этом условно принималось, что полное биохимическое потребление кислорода характеризует содержание органического вещества [10].

Для оценки роли автохтонного вещества использовались данные о первичной продукции фитопланктона [17, 23, 31], бактериопланктона [17] и макрофитов [17, 36, 37].

Сведения о продукции перифитона, фитомикробентоса и зеленых нитчатых водорослей в Иваньковском водохранилище отсутствуют. Правда, известно, что в некоторых водоемах образование органического вещества перифитоном составляет 27, фитомикробентосом 46, а нитчатыми водорослями 37% продукции фитопланктона [22]. В наших расчетах принято допущение, что поступление органических веществ от каждого из этих фитоценозов составляет 30% поступления их от фитопланктона. Прижизненные выделения органических веществ водными растениями дают от 7 до 50% синтезированного последними органического вещества [1, 34]. В расчетах принято, что объем экстраклеточных выделений микрофитов составляет 30% их продукции. Поскольку прижизненные выделения представляют собой легкоусвояемое органическое вещество, то в нем $C/N=6$, а $C/P=150$ [27]. Было принято также, что при отмирании водорослей и высших водных растений поступление органического вещества в водоем за год в целом соответствует его продукции [24]. При этом учитывалось, что в составе альгофлоры содержится 16 и 2% органического азота и фосфора соответственно [21], а в составе сухого органического вещества высшей водной растительности 46,4% органического углерода [22], 4,4% органического азота и 0,4% органического фосфора [18]. Кроме того, образование органического вещества бактериями в процессе гетеротрофной ассимиляции углекислоты было принято равным 6% общей их продукции [25].

При расчетах расхода органических веществ условно принималось, что макрофиты поглощают из воды 50% общих усвоенных веществ. На долю гетеротрофного питания отводилось 20% живого вещества. Считалось, что от альгофлоры в донные отложения поступает 25% синтезированных веществ, поскольку в воде разлагается 75% сестона [7, 8, 33]. При оценке поступления органических веществ в грунты учитывалось, что за год из растительной массы макрофитов высвобождаются и мигрируют в воду ~8% органического вещества, 15% органического и 35% минерального азота, а также 70% минерального фосфора (от общего их содержания в растениях [9]), а соотношение $C_{орг}/P_{орг}=150$ [28]. Следовательно, оставшаяся часть веществ поступает в донные отложения. При переводе перечисленных показателей в различные единицы измерения использовались общепринятые коэффициенты пересчета [20].

Приходная часть баланса. С речным стоком в Иваньковское водохранилище ежегодно вносится 79,9 тыс. т органического углерода. Ежегодное поступление общего азота с волжской водой составляет 4,2 тыс. т, с водой р. Тверцы 0,38 тыс. т, а с другими притоками 3,1 тыс. т, т. е. суммарное поступление азота в водоем с речным стоком равно ~7,7 тыс. т. Поступление фосфора со стоком Волги и Тверцы ежегодно составляет 0,42, а со стоком притоков 0,17 тыс. т, т. е. в целом с речным стоком в водоем вносится ~0,6 тыс. т фосфора. С атмосферными осадками на

Таблица 1

Статьи прихода	Приходная часть баланса					
	Сорг		Nобщ		Pобщ	
	тыс. т	% общего прихода	тыс. т	% общего прихода	тыс. т	% общего прихода
Аллохтонное вещество						
Речной сток	79,8	25,0	7,7	14,0	0,6	10,5
Загрязняющие вещества	53,5	16,8	19,7	35,7	1,8	32,2
В том числе:						
городов	10,1	3,2	1,9	3,4	0,2	3,5
животноводческих комплексов	35,1	11,0	12,3	22,3	1,32	23,1
торфоразработок	0,004	0,001	0,8	1,5	0,02	0,3
речного транспорта	0,02	0,01	—	—	—	—
рекреации	0,03	0,01	0,01	0,02	0,002	0,03
сельских населенных пунктов	8,2	2,6	1,6	2,9	0,1	1,7
Сток с сельскохозяйственных угодий	—	—	3,1	5,6	0,2	3,5
Атмосферные осадки	0,7	0,2	0,2	0,3	0,004	0,07
Всего	134,0	42,0	27,6	50,0	2,4	42,7
Автохтонное вещество						
Первичная продукция	175,3	55,0	26,0	47,2	3,2	55,6
В том числе:						
высшей водной растительности	30,2	9,5	2,9	5,3	0,3	5,2
фитопланктона	76,4	24,0	12,2	22,1	1,5	26,1
перифитона, фитомикробентоса и нитчатых водорослей	68,7	21,5	10,9	19,8	1,4	24,3
Прижизненные выделения высшей водной растительности	9,1	2,9	1,5	2,7	0,1	1,6
Темновая ассимиляция CO ₂ бактериями	0,3	0,1	0,05	0,1	0,01	0,1
Всего	184,7	58,0	27,55	50,0	3,31	57,3
Итого	318,7	100	55,15	100	5,71	100

зеркало водохранилища попадает 0,7 тыс. т органического углерода, 0,2 тыс. т азота и 0,004 тыс. т фосфора.

Сточные воды городов, животноводческих комплексов, торфопредприятий, а также загрязняющие вещества, поступающие в водоем от речного транспорта и в результате рекреационного использования водоемов, создают ежегодную нагрузку органического углерода на водоем в размере 45,3 тыс. т, а сельские населенные пункты 8,2 тыс. т (в сумме 53,5 тыс. т). Поступление общего азота в водоем от антропогенных источников составляет 19,7 тыс. т, при этом большая часть (12,3 тыс. т) является продуктом животноводства. Со сточными водами и при смыве минеральных удобрений в водохранилище вносится 1,8 тыс. т фосфора, в том числе 1,32 тыс. т со стоками животноводческих ферм.

Таким образом, из аллохтонных веществ ежегодно в водохранилище поступает 27,6 тыс. т азота, 2,4 тыс. т фосфора и 134,0 тыс. т органического углерода (табл. 1).

Поступление автохтонного органического вещества, азота и фосфора обеспечивается фотосинтезом водорослей и высшей водной раститель-

ности, их экстраклеточными выделениями, а также процессами гетеротрофной ассимиляции углекислоты. Годовая продукция фитопланктона Ивановского водохранилища достигает 76,4 тыс. *t* (в органическом углероде). Продукция перифитона, микрофитобентоса и зеленых нитчатых водорослей при принятых нами допущениях составляет в сумме 68,7 тыс. *t* органического углерода. Ежегодная продукция высшей водной растительности в Ивановском водохранилище равна 54 тыс. *t*, или, если учесть отмирающую в течение года и осеннего роста растительность, 65 тыс. *t* органического вещества. Годовая продукция бактериопланктона в Ивановском водохранилище составляет ~7% продукции фитопланктона, следовательно, в процессе гетеротрофной ассимиляции углекислоты создается 0,3 тыс. *t* органических веществ. Всего в водохранилище из автохтонного вещества ежегодно попадает 184,7 тыс. *t* органического углерода, 27,55 тыс. *t* азота и 3,31 тыс. *t* фосфора.

Общий приход органического углерода, азота и фосфора равен 318,7, 55,15 и 5,71 тыс. *t* соответственно. Аллохтонное поступление органического вещества дает 42% общего его прихода, причем большая часть вносится в водоем с речным стоком (25,0%). На долю антропогенных источников приходится 16,8% общего прихода органического вещества в водоем. Автохтонное поступление органического углерода составляет 58% общего прихода. При этом более его половины образуется за счет фотосинтеза фитопланктона (24% всего органического углерода, поступающего в водохранилище). На долю продукции высшей водной растительности приходится лишь 10%, а экстраклеточные продукты макрофитов дают 3% поступления органического углерода.

В приходной части баланса поступление общего азота извне составляет 50%. Основными источниками аллохтонного азота являются антропогенное загрязнение и речной сток (36 и 14% общего прихода соответственно). При этом существенная доля азота вносится в водохранилище со сточными водами от животноводческих комплексов (22%).

Внутриводоемные процессы обеспечивают поступление в водоем 50% всего вносимого азота. Почти половина автохтонного азота поступает в водохранилище от фитопланктона. Аллохтонный фосфор составляет 43% прихода, в основном за счет речного стока (10%) и антропогенных источников (32%). Следует отметить, что величина поступления фосфора в водоем несколько занижена, поскольку в ряде случаев учитывался только минеральный растворенный фосфор.

Автохтонный фосфор дает 57% приходной статьи баланса. Основная его доля поступает в воду от фитопланктона (26% общего прихода). На долю высшей водной растительности и ее внеклеточных продуктов приходится 7% общего поступления фосфора.

Таким образом, в приходной статье баланса органического углерода, общих азота и фосфора аллохтонные источники составляют 42—50%. Несколько большая доля веществ (50—58%) поступает в воду в результате жизнедеятельности альгофлоры и высшей водной растительности.

Расходная часть баланса. Органические вещества, поступающие в водохранилище, как уже говорилось, убывают со стоком через гидросооружения, поглощаются гидробионтами, минерализуются, уходят в донные отложения.

Расход через гидросооружения за год составляет 132,2 тыс. *t* органического углерода, 13,1 тыс. *t* азота и 0,7 тыс. *t* фосфора. Деструкция органического вещества в воде равна 33,7 тыс. *t* органического углерода; с ним разрушается 5,4 тыс. *t* и 0,7 тыс. *t* органического азота и фосфора.

При образовании продукции фитопланктона из воды извлекается 12,2 тыс. *t* азота и 1,5 тыс. *t* фосфора. Кроме того, на гетеротрофное

Таблица 2

Расходная часть баланса

Статьи расхода	С _{орг}		N _{общ}		P _{общ}	
	тыс. т	% общего расхода	тыс. т	% общего прихода	тыс. т	% общего прихода
Сток через гидроузел и канал	132,2	50,5	13,1	23,8	0,7	12,9
Поглощение	31,6	12,1	29,3	53,3	3,2	58,9
в том числе:						
высшей водной растительностью	2,6	1,0	1,4	2,6	0,1	1,8
фитопланктоном	15,3	5,9	14,7	26,7	1,6	29,5
перифитоном, фитомикробентосом и нитчатыми водорослями	13,7	5,2	13,2	24,0	1,5	27,6
Поступление в донные отложения						
в том числе:						
от высшей водной растительности	27,8	10,6	1,4	2,6	0,1	1,8
от фитопланктона	19,1	7,3	3,1	5,6	0,4	7,4
от перифитона, фитомикробентоса и нитчатых водорослей	17,2	6,6	2,7	4,9	0,3	5,5
Деструкция	33,7	12,9	5,4	9,8	0,7	12,8
Вылов рыбы	0,1	0,04	0,02	0,04	0,03	0,6
Итого	261,7	100	55,02	100	5,43	100

питание расходуется 15,3 тыс. т органического углерода, 2,5 тыс. т органического азота и 0,1 тыс. т органического фосфора. В целом фитопланктон поглощает из воды ежегодно 15,3 тыс. т органического углерода, 14,7 тыс. т азота и 1,6 тыс. т фосфора. Высшие водные растения поглощают из воды 2,6 тыс. т органического углерода, 1,4 тыс. т минерального азота и 0,1 тыс. т минерального растворенного фосфора. Поскольку часть веществ вновь возвращается в воду, в донные отложения при разложении макрофитов уходит 27,8 тыс. т органического углерода, 1,4 тыс. т азота и 0,1 тыс. т фосфора. В целом в донные отложения из водорослей и макрофитов уходит 64,0 тыс. т органического углерода, 7,2 тыс. т азота и 0,8 тыс. т фосфора, что составляет 13—25% общего расхода этих веществ.

Вместе с рыбой, улов которой достигает 180 тыс. ц в год [19, 26], из водохранилища ежегодно извлекается ~100 т органического углерода, 28 т азота и 3 т фосфора.

Рассчитанные статьи расходной части баланса представлены в табл. 2. В целом расходную часть баланса веществ составляют 261,7 тыс. т органического углерода, 55 тыс. т азота и 5,4 тыс. т фосфора.

Основная часть расхода органического углерода приходится на сток через гидросооружения (50,5%); второй существенной частью расхода органического углерода является поступление органического вещества в грунты из растительной массы (24,5%). На долю поглощения органических веществ альгофлорой и высшей водной растительностью приходится 12%. Выловы рыбы на водохранилище незначительны (0,1% общего расхода органического углерода). Деструкции в толще воды подвергается 13% общего расхода органического углерода.

Основную долю расходной части баланса общего азота составляет питание водорослей (50%). Существенную часть расхода составляет сток азота через гидросооружения (24%). В донные отложения из расти-

Таблица 3

Баланс углерода, азота и фосфора в Ивановском водохранилище

Статья баланса	C _{орг.} тыс. т	N _{общ.} тыс. т	P _{общ.} тыс. т
Приход	318,7	55,15	5,71
Расход	261,7	55,02	5,43
Аккумуляция	57,0	0,13	0,28
	17,9*	0,24*	4,9*

* В процентах.

тельной массы ежегодно поступает 7% азота (от общего расхода этого элемента).

Основной расход фосфора также связан с поглощением его альгофлорой (57%). Значительную часть расхода составляет сток фосфора через гидросооружения (13%). В донные отложения с растительной массой поступает ежегодно 15% общего фосфора. Минерализации в воде подвергается ~10% азота и 13% фосфора (от общего расхода этих веществ). Изъятие азота и фосфора с рыбой незначительно — 0,04 и 0,6% соответственно.

Баланс углерода, азота и фосфора. На основании статей прихода и расхода веществ составлен ориентировочный баланс органического углерода, азота и фосфора для Ивановского водохранилища (табл. 3).

Полученные материалы показывают, что ежегодно в водоем поступает 750 тыс. т органического вещества, из которого на аллохтонное приходится около 300 тыс. т (или 134 тыс. т органического углерода). Приход автохтонного органического вещества составляет ~450 тыс. т (или 319 тыс. т органического углерода), где 365 тыс. т приходится на органическое вещество альгофлоры и 84 тыс. т — высшей водной растительности. Таким образом, в процессе жизнедеятельности водорослей и макрофитов образуется до 58% всего органического вещества, поступающего в водоем. Вклад аллохтонных источников органического вещества несколько ниже — 42% общего прихода.

Как видно, поступление органических и биогенных веществ в водохранилище превышает их расход. Если сопоставить величину внесения этих веществ в водоем извне со стоком их из водохранилища через гидросооружения, получается, что ежегодно в водоеме остается 1,3% органического углерода, 53% азота, 71% фосфора от общего аллохтонного поступления (или 1,8 тыс. т органического углерода, 14,5 тыс. т азота и 1,7 тыс. т фосфора). Ежегодное накопление этих веществ и включение их в круговорот обеспечивает новообразование органического вещества.

Общее поступление веществ превышает их расход на 57 тыс., 0,13 тыс. и 0,3 тыс. т для органического углерода, азота и фосфора соответственно. В реальных условиях возможна и более высокая аккумуляция фосфора, поскольку, как уже указывалось, в отдельных случаях в приходной части учитывался только минеральный растворенный фосфор. С учетом ухода веществ в донные отложения в водохранилище ежегодно остается 38% всего поступившего в водоем органического углерода, ~13% азота и 19% фосфора, которые будут подвергаться дальнейшей трансформации и аккумуляции в донных отложениях.

Баланс железа, марганца, меди и цинка. Для подведения баланса микроэлементов в Ивановском водохранилище было изучено их со-

держание в воде, водных растениях и в донных отложениях. Пробы воды фильтровали непосредственно после отбора и концентрировали выпариванием; образцы водных растений, взятых вместе с корнями, после сушивания и прокаливания растворяли в смеси азотной и соляной кислот. Образцы донных отложений обрабатывали по методу Steele [38]. Железо, марганец, медь и цинк определяли методом атомно-абсорбционного анализа на спектрофотометре Перкин-Эльмер.

В связи с сезонными изменениями состава речных вод содержание микроэлементов в воде Иваньковского водохранилища и его притоков изучали зимой, весной, осенью и летом 1977 г.

В качестве исходных концентраций микроэлементов, поступающих в водохранилище в составе волжской воды, взяты концентрации их в воде верхней части водохранилища (в середине русла у дер. Слобода); для характеристики вытекающей воды использованы концентрации микроэлементов в воде у плотины. Воды притоков исследованы близ их устьев. Содержание микроэлементов в атмосферных осадках определяли по лежалому снегу, поскольку тающие снега составляют главную массу осадков, участвующих в питании Иваньковского водохранилища.

Как правило, наибольшие концентрации всех четырех микроэлементов в речных водах наблюдаются зимой, наименьшие — весной и летом (табл. 4).

Сравнение среднегодовых концентраций микроэлементов в водах различных притоков и водохранилища показывает, что поступающая в него волжская вода содержит значительно меньше железа и марганца и, напротив, больше меди и цинка, чем воды притоков. Эта тенденция наиболее ярко проявляется для цинка, концентрация которого в волжской воде у дер. Слобода в среднем за год в 2 раза выше, чем в р. Шоше и р. Ламе, и примерно в 1,5 раза выше, чем в остальных притоках.

Общий приход воды в Иваньковское водохранилище, составляющий в среднем $9,36 \text{ км}^3/\text{год}$, складывается из расходов, приведенных ниже.

Объект	Поступление воды, $\text{км}^3/\text{год}$
Волга ниже впадения Тверцы	7,416
Лама и Шоша	0,994
Остальные правобережные притоки	0,361
Левобережные притоки	0,271
Атмосферные осадки	0,318
Итого	9,36

Наибольшая масса воды приносится в Иваньковское водохранилище Волгой, а все остальные поступления составляют менее 20%.

В табл. 5 приводится баланс железа, марганца, меди и цинка, мигрирующих в Иваньковское водохранилище в растворенном состоянии в течение года. Как видно из таблицы, общий приход растворенных железа, марганца, цинка и меди за год составляет 3069; 652; 353 и 62,4 т. Значительная часть микроэлементов оседает в водохранилище: железо 26,8%, цинк 20%, марганец 9,4%, медь 1,1% общего прихода.

Оседание микроэлементов в водохранилище связано с рядом процессов, одним из которых является поглощение химических элементов водной растительностью. Для количественной оценки влияния этого процесса на удаление микроэлементов из воды авторами было исследовано содержание их в различных видах водных растений. Учитывая, что прикрепленные водные растения извлекают микроэлементы как из воды, так и из донных отложений, для расчета баланса микроэлементов в воде использовались данные о среднем их содержании только в свободнопла-

Таблица 4

Концентрация микроэлементов в водах, поступающих в Ивановское водохранилище

Объекты исследования	Концентрация микроэлементов, мкг/л				
	зимой	весной	летом	осенью	среднее за год
Fe					
Волга у дер. Слобода	408	225	145	480	314
Шоша	882	330	75	410	424
Лама	942	355	105	445	462
Правобережные притоки	820	326	474	272	474
Левобережные притоки	847	308	195	220	392
Атмосферные осадки (снег)	80	—	—	—	80
Иваньковское водохранилище у плотины	225	275	220	240	240
Mn					
Волга у дер. Слобода	120	25	56	28	57
Шоша	647	45	21	60	193
Лама	410	52	40	65	141
Правобережные притоки	470	34	95	35	158
Левобережные притоки	190	95	53	25	91
Атмосферные осадки (снег)	19	—	—	—	19
Иваньковское водохранилище у плотины	81	70	85	45	70
Cu					
Волга у дер. Слобода	10,5	5,0	4,3	8,0	7,0
Шоша	7,5	5,0	4,5	11,0	7,0
Лама	9,0	5,5	2,5	5,0	5,5
Правобережные притоки	6,1	5,6	3,4	5,0	5,0
Левобережные притоки	3,5	5,0	6,5	5,0	5,0
Атмосферные осадки (снег)	4,8	—	—	—	4,8
Иваньковское водохранилище у плотины	7,0	7,0	8,0	7,0	7,3
Zn					
Волга у дер. Слобода	76,7	17,5	27,2	39,0	40
Шоша	25,0	15,0	15,5	17,0	18
Лама	25,0	16,5	15,5	30,0	22
Правобережные притоки	45,6	17,0	17,0	20,0	25
Левобережные притоки	32,5	22,0	25,5	27,0	27
Атмосферные осадки (снег)	60,0	—	—	—	60
Иваньковское водохранилище у плотины	46,5	21,5	19,5	34,0	30

вающих растениях. Определить непосредственно содержание микроэлементов в фитопланктоне не представлялось возможным из-за трудности его отделения при фильтровании речной воды. Поэтому было условно принято, что интенсивность поглощения микроэлементов фитопланктоном не меньше, чем у свободноплавающих растений. Общая продукция последних составляет 3,89 тыс. т сухой массы в год, фитопланктона — 202 тыс. т, т. е. всего 206 тыс. т. В табл. 6 приведены полученные данные о накоплении микроэлементов в указанных видах растительных организмов.

Сравнение массы микроэлементов, поглощаемых водными растениями за год, с рассчитанной массой оседающих в водохранилище микроэлементов (см. табл. 6) показывает, что количества марганца и меди, проходящие через водную растительность за год, во много раз (для марганца в 36 раз, для меди в 7) превышают их массу, осевшую за это время в Ивановском водохранилище. Это свидетельствует об интенсивном круговороте указанных элементов в связи с быстрым ростом и распадом

Таблица 5

Среднегодовое количество микроэлементов, поступающих с водой в Ивановское водохранилище и выносимых из него

Источники поступления	Fe		Zn		Mn		Cu	
	т	% общего прихода	т	% общего прихода	т	% общего прихода	т	% общего прихода
Приход								
Волга и Тверца	2328	76,0	423	60,8	51,5	82,6	297	84,1
Шоша и Лама	439	14,2	167	25,7	6,2	10,0	20	5,7
Правобережные притоки	171	5,6	57	8,8	1,8	2,9	9	2,5
Левобережные притоки	106	3,4	25	3,8	1,4	2,2	7	2,1
Атмосферные осадки	25	0,8	6	0,9	1,5	2,3	20	5,6
Итого	3069,0	100	678,0	100	62,4	100	353,0	100
Расход	2245,0		655,0		61,7		282,0	
Оседает в Ивановское водохранилище	824,0	26,8	23,0	9,4	0,7	1,1	71,0	20,0

Таблица 6

Содержание микроэлементов и поглощение их свободноплавающими растениями и фитопланктоном

Химический элемент	Среднее содержание в растениях, % сухого вещества	Количество, поглощенное за год, тыс. т	% общего количества, осевшего в водохранилище за год
Fe	0,31	638	77
Mn	0,40	824	3600
Cu	0,0024	4,9	700
Zn	0,026	53	75

водных растительных организмов (в основном фитопланктона). Таким образом, главным процессом выведения марганца и меди из раствора является биологическое накопление их водными растениями.

Количество железа и цинка, поглощаемое растительностью за год, составляет $\frac{3}{4}$ их массы, осевшей в водохранилище. Однако эти химические элементы наряду с марганцем и медью участвуют в круговороте при распаде водной растительности и, следовательно, фактически не $\frac{3}{4}$ массы, а гораздо меньшие количества железа и цинка накапливаются растениями. Таким образом, следует признать значительную роль других процессов, способствующих выведению их из раствора. Для железа — это главным образом осаждение в виде гидроокиси и отчасти сорбция, для цинка — сорбция его гидроокисью железа и глинистыми частичками взвеси.

Отметим, что прикрепленные растения, извлекающие микроэлементы из донных отложений, после отмирания обогащают их железом, марганцем, медью, цинком и другими химическими элементами.

Сопоставим полученные в эксперименте данные, характеризующие разность между приходом и расходом микроэлементов в Ивановском водохранилище за год, с общим количеством этих элементов в массе донных отложений, оседающих в течение года и составляющих, согласно [2], 490 тыс. т. Как известно, донные отложения водохранилища наполовину представлены песчанистыми и серыми илами, наполовину — илистыми песками. По нашим определениям, наибольшее количество микроэлементов содержится в серых илах, примерно в 2 раза меньше — в песчанистых илах и еще вдвое меньше — в иловых песках. Средняя

Таблица 7

Среднее содержание микроэлементов в донных отложениях

Химические элементы	Средняя концентрация в донных отложениях, %	Общее поступление в донные отложения за год, т	Микроэлементы, поступающие из воды за год	
			т	% общего поступления
Fe *	4,0	19 600	824	4,2
Mn	0,047	230	23	10,0
Cu	0,005	24,5	0,7	2,7
Zn	0,030	147	71	48,6

* Содержание железа приводится по [2].

концентрация микроэлементов в донных отложениях, рассчитанная исходя из результатов собственных исследований, приведена в табл. 7.

Железо, марганец и медь, поступающие в илы из раствора, составляют лишь небольшую часть общего их количества, накапливающегося ежегодно в донных отложениях. Большая часть этих элементов привносится в составе глинистых минералов или же сорбируется на минералах и гидроокисях; при этом микроэлементы, растворенные в воде и сорбированные твердым веществом, уже находятся в сорбционном равновесии. Кроме того, микроэлементы поступают в донные отложения в составе аллохтонного органического вещества.

Проведенный баланс показывает, что большую роль в выделении цинка из воды играет процесс его сорбции твердым веществом, происходящий в самом водохранилище. Отсюда следует вывод, что в речной воде, поступающей в водохранилище, равновесие между цинком в растворе и взвесью еще не достигнуто, так как часть цинка поступает непосредственно в водохранилище с промышленно-бытовыми сточными водами.

Иловая вода, пропитывающая донные отложения в естественном состоянии, составляет 70—80% их массы. Исследования показали, что она содержит во много раз больше микроэлементов, чем вода водохранилища (см. ниже).

Элемент	Содержание, мкг/л
Fe	9060
Mn	2660
Cu	66
Zn	290

Общее количество отложений, скопившихся на дне Иваньковского водохранилища за время его существования, составляет ~22 млн. т, из которых половина, по данным [2], представлена серыми и песчанистыми илами. Вода, пропитывающая илы в естественном состоянии, составляет суммарно $2,3 \cdot 10^{10}$ л. Отсюда рассчитана общая масса микроэлементов, растворенных в иловых водах донных отложений: 208 т железа, 61 т марганца, 1,5 т меди и 6,7 т цинка.

В воде водохранилища одновременно находится $1,12 \text{ км}^3$ воды, в которой растворено в среднем за год 318 т железа, 74,3 т марганца, 7,5 т меди и 38 т цинка. Следовательно, несмотря на то что иловые воды составляют всего 2% общего объема воды в водохранилище, количество растворенных в них микроэлементов вполне соизмеримо с общей массой микроэлементов, растворенных в водных массах самого водохранилища.

Поступила 9 IV 1979

Литература

1. Бурлакова З. П., Кондратьева Т. М., Хайлов К. М. Выделение и поглощение растворенных метаболитов водорослями. В кн.: «Экологическая физиология морских планктонных водорослей». Киев, «Наукова думка», 1971.
2. Буторин Н. В., Зиминова Н. А., Курдин В. П. Донные отложения Верхневолжских водохранилищ. Л., «Наука», 1975.
3. Былинкина А. А. Скорость оборота минерального фосфора в Ивановском водохранилище в весенний период. Информ. бюл. ИБВВ АН СССР, 1972, № 16.
4. Былинкина А. А. Режим фосфора в Ивановском водохранилище в вегетационный период 1972 г. Тр. ИБВВ АН СССР, 1974, вып. 29(32).
5. Былинкина А. А. О времени и скорости оборота минерального фосфора в поверхностных водах. Материалы к совещанию по прогнозированию содержания биогенных элементов и органического вещества в водохранилище. Рыбинск, 1969.
6. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водоохранилища Верхней Волги. Л., Гидрометеиздат, 1975.
7. Горшкова Т. И. О скорости распада органического вещества фитопланктона Таганрогского залива. Докл. АН СССР, 1955, т. 104, № 1.
8. Горюнова С. В. Прижизненные выделения водорослей, их физиологическая роль и влияние на общий режим водоемов. Гидробиол. ж., 1966, т. 2, № 4.
9. Денисова А. М., Майстренко Ю. Г., Бажук В. М. Древесная, луговая и высшая водная растительность как источник поступления биогенных и органических веществ в существующие и проектируемые водохранилища. Матер. к совещанию по прогнозированию содержания биогенных элементов и органического вещества в водохранилищах. Рыбинск, 1969.
10. Драчев С. М., Сосунова И. Н. Превращения органического вещества в загрязненной реке с зарегулированным течением. Тр. ВГБО, 1953, т. 5.
11. Драчев С. М., Былинкина А. А., Петухова Л. А. Источники поступления и содержание фосфора в Ивановском водохранилище. Информ. бюл. ИБВВ АН СССР, 1972, № 16.
12. Драчев С. М., Былинкина А. А., Трифонова Н. А., Кудрявцева Н. А. Антропогенные факторы формирования химического состава и содержания биогенных элементов в водохранилищах Волги. II конф. по изучению водоемов бассейна Волги. Борок, 1974.
13. Драчев С. М., Былинкина А. А., Трифонова Н. А., Кудрявцева Н. А. Влияние антропогенных факторов на содержание биогенных элементов и солевой состав водохранилищ Волги. В кн.: «Биологические продукционные процессы в бассейне Волги». Л., «Наука», 1976.
14. Дроздова В. М., Петренчук О. П., Селезнева Е. С., Свистов П. Ф. Химический состав атмосферных осадков на Европейской территории СССР. Л., Гидрометеиздат, 1964.
15. Зиминова Н. А., Григорьева Е. Р. Поступление аллохтонного органического вещества в Ивановское водохранилище. Информ. бюл. ИБВВ АН СССР, 1974, № 24.
16. Зиминова Н. А., Трифонова Н. А., Григорьева Е. Р. Органическое вещество и биогенные элементы во взвешях верхней Волги. В кн.: «Биологические продукционные процессы в бассейне Волги». Л., «Наука», 1976.
17. Ивановское водохранилище и его жизнь. Тр. ИБВВ АН СССР, 1978, вып. 34(37).
18. Корелякова И. Л. Химический состав высшей водной растительности Киевского водохранилища. Гидробиол. ж., 1970, т. 6, № 5.
19. Никаноров Ю. И., Мосияш С. С. Что волнует рыболовов? Рыболовство и рыбоводство, 1977, № 4.
20. Обозначения, единицы измерения и эквиваленты, встречаемые при изучении продуктивности пресных вод. Л., АН СССР, Советский национальный комитет по Международной биологической программе, 1972.
21. Помилуйко В. Н., Стеценко Н. М. Пленки сухих синезеленых водорослей как дополнительный источник обогащения воды водохранилищ органическими и минеральными веществами. В сб.: «Физиологические активные соединения биогенного происхождения». М., Изд-во МГУ, 1971.
22. Продукционно-биологические исследования экосистем пресных вод. Минск, Изд-во БГУ, 1973.
23. Пырина И. Л. Первичная продукция фитопланктона в Ивановском, Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах в зависимости от некоторых факторов. Тр. ИБВВ АН СССР, 1966, вып. 13(16).
24. Распопов И. М. Фитомасса и продукция макрофитов Онежского озера. В кн.: «Микробиология и первичная продукция Онежского озера». Л., «Наука», 1975.
25. Романенко В. И., Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. Л., «Наука», 1974.

26. *Салло Г. Б.* Биология, запасы леда Ивановского водохранилища и влияние на них сбросных вод Конаковской ГРЭС. Автореф. канд. дис. Л., ГосНИОРХ, 1976.
27. *Скопинцев Б. А.* Органическое вещество в природных водах (водный гумус). Тр. ГОИН, 1950, вып. 17 (29).
28. *Скопинцев Б. А.* О соотношении между кислородом окисляемости, органическим углеродом и общим содержанием органического вещества в природных водах. Гидрохимич. матер., 1950, т. 18.
29. *Скопинцев Б. А., Бакулина А. Г.* Органическое вещество в водах Рыбинского водохранилища в 1964 г Тр. ИБВВ АН СССР, 1966, вып. 13 (16).
30. Строительные нормы и правила (СНиП) 11—32—73, ч. II, гл. 32. Канализация. Наружные сети и сооружения. М., Стройиздат, 1975.
31. *Тарасенко Л. В., Салло Л. М.* Фитопланктон, первичная продукция и деструкция органического вещества в Ивановском водохранилище. III съезд ВГБО, тез. докл., т. 3. Рига, «Зинатне», 1976.
32. *Турунина Н. В.* Токсикологическая характеристика загрязнения Ивановского водохранилища. Автореф. канд. дис. Л., ГосНИОРХ, 1979.
33. *Федоров В. Д.* О закономерностях отмирания клеток в размножающихся культурах синезеленых водорослей *Anabaena variabilis*, *Amorphonostoc punctiforme*. Докл. АН СССР, 1962, т. 14, № 6.
34. *Хайлов К. М.* Экологический метаболизм в море. Киев, «Наукова думка», 1971.
35. Человек. Медико-биологические данные. М., «Медицина», 1977.
36. *Экзерцев В. А., Довбня И. В.* Годовая продукция гидрофильной растительности водохранилищ Волги. II конф. по изучению водоемов бассейна Волги. Борок, 1974.
37. *Экзерцев В. А., Мишулина Г. И.* О заболачивании мелководий Ивановского водохранилища. Информ. бюл. ИБВВ АН СССР, 1976, № 33.
38. *Steele K. F., Wagner G. H.* Trace metal relationships in bottom sediments of the fresh water stream in the Buffalo River, Arkansas. J. Sedim. Petrol., 1975, vol. 45, No. 1.