

## ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД ЗАЛИВОВ БРАТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

**Алиева В.И., Пастухов М.В.**

*Институт геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН, г. Иркутск,  
e-mail: [alieva@igc.irk.ru](mailto:alieva@igc.irk.ru)*

В настоящее время в исследованиях процессов трансформации качественного состава вод, помимо природных факторов, следует учитывать и множественные антропогенные факторы – в основном это сточные воды промышленных предприятий и городских коммуникаций. Наряду с воздействием химических предприятий, на гидрохимический состав Братского водохранилища оказывает влияние деятельность большого количества лесозаготовительных организаций, использующих его заливы для накопления и транспортировки заготовленной древесины. Древесные остатки, засоряющие дно водоема и накапливающиеся в водохранилище, начиная с периода его наполнения, постоянно увеличиваются в объеме в результате лесозаготовительной деятельности. Затопленные пойменные почвы и древесные остатки являются источниками поступления большого количества органических веществ, деградация которых сопровождается увеличением в воде соединений азота, фосфора, фенолов и т.д. Изменения химического состава вод, происходящие в результате разложения древесины, могут негативно влиять на экосистему водоема.

Изучение химического состава воды было проведено в 17 заливах Ангарской, 6 заливах Окинской и 4 заливах Ийской частей Братского водохранилища. Пробы воды отбирали фторопластовым батометром с двух горизонтов: поверхностного – глубина 0,6 м и придонного – в метровом слое от дна. Химический анализ для определения макро- и биогенных элементов выполнен по стандартным методикам [Руководство..., 1977]. Содержание органического углерода рассчитано, исходя из эквивалентного отношения углерода к кислороду через химическое потребление кислорода.

Воды заливов Братского водохранилища гидрокарбонатные кальциевые, маломинерализованные, сохраняют черты гидрохимического состава рек Ангары, Оки и Ии. Наименьшая величина минерализации, характерная для горно-таежных рек Восточной Сибири [Бочкарев, 1959], определена в Ийской части водохранилища. Распределение макроэлементов в водах заливов сопоставимо с таковыми в центральных частях водоемов. В то же время выделяются заливы, макроэлементный состав которых имеет некоторые отличия. На изменение концентраций гидрокарбонат-, сульфат-ионов, ионов кальция, магния и калия, как и на величину общей минерализации, в водах заливов существенное влияние оказывают притоки водоема. Так, в придонных водах заливов Верхний Баян, Ярма и Подволочный зафиксированы повышенные концентрации  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , в водах заливов Топорок и Худобка –  $\text{HCO}_3^-$  и т.д. Средняя величина рН рассматриваемых водотоков относится к группе нейтральных вод, изменяясь от слабокислых (до 6.0) до щелочных (до 8.8).

Основной формой нахождения азота в заливах Братского водохранилища является нитрат-ион. Средние концентрации  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  в водах заливов Ангарской части составляют 0.27 мг/дм<sup>3</sup>, 0.012 мг/дм<sup>3</sup> и 0.018 мг/дм<sup>3</sup>, соответственно. Заметное превышение (до 10 раз) этих значений зафиксированы в воде заливов Тарей, Травкина Баля, Озерная Баля, расположенных в непосредственной близости друг от друга. Еще более высокие концентрации соединений азота определены в воде всех заливов Окинской и Ийской частей водохранилища, среднее содержание нитрат-иона в которых составляет 0.69 мг/дм<sup>3</sup>, нитрит-иона – 0.130 мг/дм<sup>3</sup>, иона аммония – 0.084 мг/дм<sup>3</sup>. В придонных водах исследованных заливов содержание всех форм азота выше, чем в поверхностных. Это может указывать как на более интенсивные процессы разложения древесных остатков в придонном слое воды, так и на массовое развитие в поверхностном слое воды планктонных водорослей.

Распределение фосфатов в водах заливов Братского водохранилища равномерно (от 0.013 до 0.083 мг/дм<sup>3</sup>), хотя на порядок выше, определенного в Братском водохранилище ранее (0.003 мг/дм<sup>3</sup>) [Верболова, 1973]. Так же, как для нитратов, наблюдается увеличение их концентраций в придонном слое воды. В заливе Тарей это различие было максимальным и составило 3,3 раза. Зависимость увеличения концентраций фосфатного фосфора с глубиной была установлена и ранее для вод открытого русла Братского водохранилища [Верболова, 1973].

Содержание кремния в воде заливов, как и других биогенных элементов, неоднородно распределено по частям водохранилища, средние концентрации SiO<sub>2</sub> в водах заливов Ангарской, Окинской и Ийской частей водохранилища составляют 1.87 мг/дм<sup>3</sup>, 3.55 мг/дм<sup>3</sup> и 5.15 мг/дм<sup>3</sup>, соответственно. В Ангарской части водохранилища отмечено увеличение концентрации кремния в заливах Тарей, Травкина Баля и Сухой Лог (до 5 раз). В придонных водах большинства исследованных заливов содержание SiO<sub>2</sub> выше, чем в поверхностных.

Поступление органического вещества в воды Братского водохранилища связано как с его переносом речным стоком в растворенной и взвешенной формах [Карнаухова, 2008], так и с планктоном [Кожова, 1969]. Вертикальное распределение Сор<sub>г</sub> в заливах Братского водохранилища имеет неоднородный характер, в одних случаях, увеличиваясь с глубиной, в других уменьшаясь или находясь на одном уровне с поверхностью. По содержанию органического углерода определен следующий убывающий ряд: воды Ийской части – воды Окинской части – воды Ангарской части водохранилища, составляя 2,7, 3,4, 5,3 мг О/дм<sup>3</sup>, соответственно.

Для изучения факторов формирования и преобразования химического состава вод заливов Братского водохранилища использованы методы математической статистики. Были рассчитаны коэффициенты парной корреляции между изучаемыми гидрохимическими компонентами. В первую выборку были включены ионы, образующие основную часть минерального состава природных вод, и величина минерализации. Выявлено, что большинство макроэлементов имеют высокие парные коэффициенты корреляции между собой и близкую к функциональной связь с величиной минерализации (табл. 1). Для маломинерализованных гидрокарбонатных кальциевых вод положительная парная корреляция между главными ионами обуславливается физико-химическими факторами. Основной вклад в обогащении вод этими компонентами принадлежит процессам химического взаимодействия вода-порода. Практически для вод всех частей водохранилища характерны высокие коэффициенты корреляции (близкие к 1) между натрием и хлором. Это позволяет говорить об их генетической связи, т.е. возможности поступления в поверхностные воды подземных вод хлоридно-натриевого состава по трещинам долины р. Ангара. Ранее отмечалось, что к Ийской части водохранилища приурочены очаги скрытой разгрузки рассолов, за счет поступления которых осуществляется привнос натрия и хлора [Дзюба, 1984].

Таблица 1

Парные коэффициенты корреляции между главными ионами вод заливов Братского водохранилища

	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Σ И*
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1							
Cl <sup>-</sup>	<b>0.71</b>	1						
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.29	<b>0.57</b>	1					
K <sup>+</sup>	<b>0.52</b>	<b>0.54</b>	0.16	1				
Na <sup>+</sup>	<b>0.67</b>	<b>0.96</b>	<b>0.53</b>	<b>0.59</b>	1			
Ca <sup>2+</sup>	<b>0.58</b>	<b>0.76</b>	<b>0.51</b>	0.26	<b>0.77</b>	1		
Mg <sup>2+</sup>	0.33	0.35	0.32	0.24	0.39	<b>0.57</b>	1	
Σ И*	<b>0.62</b>	<b>0.80</b>	<b>0.58</b>	0.34	<b>0.80</b>	<b>0.95</b>	<b>0.73</b>	1

\* - величина минерализации

Вторая выборка охватывала макро- и биогенные компоненты поверхностных и придонных вод заливов Братского водохранилища. По коэффициентам парной корреляции эти компоненты четко разделяются на две группы (табл. 2). Одна группа включает в себя органический углерод и биогенные компоненты, между которыми установлены значимые положительные коэффициенты корреляции. Во второй группе органический углерод и биогенные компоненты имеют устойчиво отрицательную корреляционную связь с макроэлементами.

Таблица 2

Значимые коэффициенты парной корреляции между макро- и биогенными компонентами вод заливов Братского водохранилища

	SiO <sub>2</sub>		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
	пов.	дно	пов.	дно	пов.	дно	пов.	дно
<b>Биогенные компоненты</b>								
SiO <sub>2</sub>			0.84	0.78	0.48	0.46	0.91	0.52
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.91	0.52	0.82	0.76		0.61		
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>		0.37						
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	0.48	0.46		0.64				0.61
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.84	0.78				0.76	0.84	0.76
Сорг	0.53		0.42	0.42			0.49	0.42
<b>Главные ионы</b>								
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.45	-0.49	-0.58	-0.69			-0.46	
Cl <sup>-</sup>	-0.67	-0.51	-0.45				-0.59	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.84	-0.83	-0.88	-0.77	-0.46		-0.88	-0.55
K <sup>+</sup>		-0.42	-0.58	-0.53			-0.40	
Na <sup>+</sup>	-0.87	-0.88	-0.91	-0.87	-0.40	-0.48	-0.88	-0.64
Ca <sup>2+</sup>	-0.82	-0.70	-0.80	-0.74		-0.37	-0.79	-0.48
Mg <sup>2+</sup>			-0.43				-0.50	
<b>Σ И</b>	<b>-0.78</b>	<b>-0.69</b>	<b>-0.78</b>	<b>-0.69</b>			<b>-0.82</b>	<b>-0.40</b>

Примечание: приведены значимые коэффициенты корреляции для числа данных в выборке ( $r = 0.37$ ,  $p > 0.05$ ); пов. – поверхность.

Биогенные компоненты, как показатели интенсивности биохимических процессов, а также процессов разложения древесных остатков, имеют высокие парные коэффициенты корреляции, которые характерны, как для придонного, так и для поверхностного слоя вод, что свидетельствует о протекании процессов разложения органических соединений по всей водной толще. Из элементов, являющихся обязательными составными частями тканей каждого живого организма, следует выделить кремний, который имеет высокие корреляционные связи со всеми исследуемыми компонентами. Это может быть объяснено его высокой биофильностью, т.к. при пониженной температуре и отсутствии прогрева водной толщи «цветение» водоемов идет за счет развития диатомовых водорослей.

Выявленные значимые коэффициенты корреляции между биогенными компонентами указывают на следующие закономерности. Прежде всего, это «классическая» положительная зависимость количества биогенных элементов и органического вещества от численности и биомассы фитопланктона. Формы азота коррелируют между собой, поскольку они генетически связаны. Связь между содержанием Сорг и NH<sub>4</sub><sup>+</sup> определяется тем, что аммиак поступает в воду в начальной фазе разложения белковых остатков. В целом же корреляционные связи между биогенными компонентами свидетельствуют о процессах деструкции органических веществ, т.е. его биохимическом разложении, как в поверхностном, так и придонном слоях заливов Братского водохранилища.

Значимые коэффициенты корреляции определены также между исследуемыми компонентами и гидрологическими параметрами вод заливов. Так выявлено, что органический углерод имеет положительную корреляцию с прозрачностью водоема, т.е. наличием детрита, а  $\text{NO}_3^-$  с показателем глубины – отрицательную, т.к. процессы нитрификации интенсивнее идут в поверхностном слое.

Положительная корреляция в пределах отдельных групп свидетельствует о генетической связи как главных ионов, так и биогенных компонентов. Для макроэлементов это является отражением физико-химических процессов их поступления за счет растворения водовмещающих пород, а поступление биогенных компонентов связано с жизнедеятельностью гидробионтов и процессами, происходящими в результате разложения древесных остатков. В то же время устойчивая отрицательная связь главных ионов с органическим углеродом и биогенными компонентами отражает биологические процессы, в ходе которых происходит снижение их концентрации. Вероятно, в данном случае имеет место отражение двух независимых друг от друга процессов – физико-химических и биохимических.

Проведенные исследования показали, что в условиях современной техногенной нагрузки, а именно больших объемов затопленной древесины в ложе водохранилища, водные массы заливов Братского водохранилища не содержат количеств биогенных элементов, превышающих уровни предельно-допустимых концентраций. Все поступающие в водоем загрязняющие вещества выводятся из него за счет процессов самоочищения, т.е. процессов, с помощью которых водная система старается восстановить экологическое равновесие. На формирование качества воды заливов в равной степени оказывают влияние как физико-химические, так и биохимические процессы, интенсивность которых является косвенным показателем самоочищения воды и определяет роль в этом процессе биологической составляющей. Однако, следует подчеркнуть, что процессы, происходящие в водоеме в результате деградации древесины, являются процессами существенно растянутыми во времени. Поэтому вопрос, справляются ли водоемы с этим и какова степень нарушения экологического равновесия, покажет только долговременный мониторинг вод заливов Братского водохранилища, а также комплексная оценка всех биотических компонентов, включая деятельность микроорганизмов как первичных индикаторов загрязнения экосистемы водоема.

*Работа поддержана грантом РФФИ № 12-05-98089-р\_сибирь\_a.*

### **Литература**

Бочкарев П.Ф. Гидрохимия рек восточной Сибири. – Иркутск: Вост. Сиб. изд-во, 1959. – 156 с.

Верболова Н.В. Формирование гидрохимического режима Братского водохранилища // Формирование планктона и гидрохимия Братского водохранилища. – Новосибирск: Наука, 1973. С. 78-119.

Дзюба А.А. Разгрузка рассолов Сибирской платформы. – Новосибирск: Наука, 1984. – 158 с.

Карнаухова Г.А. Гидрохимия Ангары и водохранилищ Ангарского каскада // Водные ресурсы, 2008. Т. 35, № 1. С. 72-80.

Кожова О.Н. Растительная продукция Братского водохранилища // Биологические продукты водоемов Сибири. – М.: Наука, 1969. С. 72-79.

Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. Семенова А.Д. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 540 с.