

Особенности гидрохимического режима Чемальского водохранилища (Горный Алтай, Республика Алтай)

Т. С. ПАПИНА, Е. И. ТРЕТЬЯКОВА

*Институт водных и экологических проблем СО РАН
656099 Барнаул, ул. Папанинцев, 105*

АННОТАЦИЯ

В статье приводятся результаты многолетних исследований (1989–1992) внутригодового изменения газового режима, физико-химических параметров, макрокомпонентного состава и органического вещества поверхностных вод Чемальского водохранилища. Проведенные исследования показали, что химический состав вод достаточно однороден по всей акватории водохранилища, что, в свою очередь, может свидетельствовать о фоновом равномерном поступлении химических веществ с площади водосбора. Содержание биогенных элементов невелико, а превалирование иона NO_3 над другими формами азота вызывается интенсивными процессами нитрификации. Сезонные изменения содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в водах Чемальского водохранилища отличаются от его сезонных изменений в незарегулированных участках реки и определяются внутриводоемными процессами.

Изучение гидрохимического режима Чемальского водохранилища проводилось в рамках научной программы "Экологические исследования и мониторинг природной среды в зоне влияния Катунских водохранилищ" с целью экологической экспертизы проектируемого Катунского гидроузла. Построенное 60 лет назад Чемальское водохранилище выбрано в качестве аналога планируемого Катунского гидроузла по гидрохимическим показателям состава вод.

ОПИСАНИЕ РАЙОНА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Чемальское водохранилище расположено в районе пос. Чемал в Республике Алтай примерно в 0,5 км от впадения р. Чемал в р. Катунь. Водохранилище образовано в 30-х гг. и к настоящему времени представляет сильно заиленный водоем. Максимальная мощность заиления в отдельных местах достигает 8 м. Грунтовая съемка осушенной части водохранилища определила, что верхний слой донных отложений – глиняная фракция (мощность до 0,2 м), средний слой – среднезернистый серый песок

(мощность 0,2–0,3 м), нижний слой – мощные илстые отложения. Максимальная глубина водохранилища 8 м, максимальная площадь водной поверхности 1,2 км².

Для изучения гидрохимического режима водохранилища и определения его способности к самоочищению были выбраны три пункта наблюдения: 1 – р. Чемал до впадения в водохранилище (фоновый створ), 2 – Чемальское водохранилище (наблюдаемый водоем), 3 – р. Чемал ниже водохранилища (контрольный створ). На самом водохранилище были выбраны 3 створа с двумя вертикалями на каждом. 1-й створ: 1-я вертикаль – 60 м от постоянного начала на правом берегу (п.н.), 2-я вертикаль – 20 м от п. н. (10 м от плотины). 2-й створ: 1-я вертикаль – 300 м от п. н., 2-я вертикаль – 50 м от п. н. (середина водохранилища). 3-й створ: 1-я вертикаль – 345 м от п. б., 2-я вертикаль – 73 м от п. б. (верховье). Пробы воды отбирали с глубины 0,6 м. Наблюдения проводились с 1989 по 1992 г. и включали определение газового состава, физико-химических параметров, макрокомпонентов, биогенных элементов, органического вещества.

№ п/п	Определяемый ингредиент	Методика определения	№ п/п	Определяемый ингредиент	Методика определения
1	CO ₂	Титриметрия	11	Фосфаты	Фотометрия
2	Кислород	»	12	NH ₄ ⁺	То же с р-ом Несслера
		метод Винклера	13	NO ₂ ⁻	То же с р-ом Грисса
3	Сероводород	Фотометрия с с п-фенилдиамином	14	NO ₃ ⁻	Фотометрия
4	Ph	Потенциометрия	15	Кремний	»
5	Eh	»	16	БПК ₅	Скляночный
6	HCO ₃ ⁻	Титриметрия	17	ХПК	Бихроматный
7	Ca ²⁺	»	18	Общая минерал.	Расчетный
8	Mg ²⁺	Расчетный	19	Жесткость	Титриметрия
9	Cl ⁻	Титриметрия	20	Перманганатная окисляемость	»
10	SO ₄ ²⁻	Турбидиметрия			

В табл. 1 приведен перечень контролируемых показателей Чемальского водохранилища и методики их определения*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что в результате длительной эксплуатации Чемальского водохранилища химический состав его поверхностных вод окончательно сформирован и достаточно стабилен. К основным факторам, определяющим изменение химического состава вод водохранилища, можно отнести питающую его р. Чемал, климат, а также хозяйственно-бытовую деятельность пос. Чемал и расположенного на правом берегу водохранилища санатория.

Физико-химические свойства и газовый режим. Воды Чемальского водохранилища и р. Чемал имеют слабощелочную реакцию, значения рН лежат в пределах 7,6–8,2. Величины окислительно-восстановительного потенциала имеют положительное значение и варьируют в пределах 170–300 мВ относительно хлор-серебряного электрода. Максимальная температура воды не превышает 16 °С. Содержание растворенного кислорода – 11,7–13,1 мг/л, а диоксида углерода незначительно – 0,5–2,5 мг/л. Содержание растворенного H₂S за весь период

наблюдений составляло < 0,005 мг/л (предел обнаружения). В табл. 2 приведены минимальные, максимальные и средние значения физико-химических характеристик и содержания растворенных газов в водах Чемальского водохранилища и р. Чемал до и после водохранилища (1989–1992 гг.)

Внутригодовые изменения физико-химических характеристик и концентраций растворенных газов в наблюдаемых точках иллюстрируют характерные изменения величин для различных гидрологических периодов: весенний коренной паводок (май–июнь), летняя межень (июль), летние дождевые паводки (август), осенняя межень (октябрь–ноябрь).

Анализ полученных зависимостей показал, что изменения величин рН за период наблюдения незначительны и четко коррелируют с содержанием гидрокарбонат-иона и обратным содержанием растворенного диоксида углерода. Повышение рН происходит в период весеннего паводка, достигая максимума в летнюю межень.

Содержание растворенного O₂ и величина окислительно-восстановительного потенциала, как и следовало ожидать, находятся в прямой зависимости друг от друга от гидрологического периода. Характер изменения этих величин скачкообразен. Максимальные значения приходятся на весенний и осенний периоды, когда с понижением температуры происходит насыщение вод кислородом. Минимальные значения соответствуют летним периодам, во время

*О. А. Алекин, А. Д. Семенов, Б. А. Скопинцев, Руководство по химическому анализу вод суши, Л., Гидрометеоиздат, 1973.

Т а б л и ц а 2

Компонент	рН			Eh, mV			O ₂ , мг/л			CO ₂ , мг/л		
	Место отбора	min	max	сред.	min	max	сред.	min	max	сред.	min	max
р. Чемал до водохранилища	7,60	8,60	8,01	120	290	195	9,71	15,4	12,5	0,53	4,49	1,76
Водохранилище												
1-й створ	7,60	8,33	7,97	160	305	238	9,90	12,7	10,9	0,66	3,10	1,64
2-й створ	7,72	8,43	8,02	115	272	198	9,77	15,2	12,4	0,12	2,85	1,51
3-й створ	7,97	8,46	8,09	186	260	225	10,1	13,5	11,6	0,48	2,11	1,41
р. Чемал после водохранилища	7,03	8,15	7,82	135	242	196	9,62	15,9	12,4	0,70	3,24	1,58

которых происходит прогрев вод водохранилища и, соответственно, уменьшение концентрации растворенного кислорода. Кроме того, в этот период года существенный вклад в уменьшение концентрации растворенного кислорода вносит активизация биохимических процессов окисления органических веществ.

Макрокомпонентный состав. Поверхностные воды Чемальского водохранилища по классификации Алекина относятся к гидрокарбонатному классу группы кальция. В группе анионов преобладают ионы HCO_3^- , на их долю в среднем приходится более 90 % от общей суммы анионов. SO_4^{2-} и Cl^- ионы находятся в подчиненном состоянии гидрокарбонатному иону, их содержание значительно ниже и составляет в среднем 9 и 1 % соответственно. В группе катионов доминирует кальций, его доля составляет 70–80 % от общей суммы катионов. На долю ионов магния и Na^+K приходится в среднем 14 и 7 % соответственно. Общая минерализация не превышает 120 мг/л, величина общей жесткости 1,5 мг-экв/л, что относит их к классу слабоминерализованных, мягких вод. В табл. 3 представлены минимальные, максимальные и средние концентрации главных ионов поверхностных

вод Чемальского водохранилища и р. Чемал до и после водохранилища (1989–1992 гг.) и их процентный состав в виде формул Курлова.

Внутригодовые изменения жесткости и общей минерализации поверхностных вод водохранилища имели следующие особенности – максимальные значения этих показателей приходились на меженные периоды, что, вероятно, связано с усилением вклада подземного питания в общий сток р. Чемал; минимальные значения приходились на весенние и летне-осенние паводки, характеризующиеся резким повышением уровня воды в реке. По-видимому, увеличение объемов стока и связанное с этим разбавление поверхностных вод р. Чемал уменьшало концентрацию всех главных ионов и общую минерализацию соответственно.

Биогенные элементы. Содержание биогенных элементов в природных водах является одним из основных показателей их качества. Их концентрации и режим целиком зависят от интенсивности биохимических и биологических процессов, происходящих в водных объектах. В этом отношении Чемальское водохранилище представляет интерес.

Т а б л и ц а 3

Компонент	Р. Чемал до водохранилища			Чемальское водохранилище			Р. Чемал после водохранилища		
	min	max	средн.	min	max	средн.	min	max	средн.
HCO_3^- , мг/л	58,1	89,7	73,8	54,1	86,2	74,3	59,3	82,9	74,1
SO_4^{2-} , мг/л	2,6	8,3	5,11	3,60	7,82	5,24	3,3	9,80	5,13
Cl^- , мг/л	0,37	1,01	0,56	0,34	0,87	0,65	0,35	0,87	0,56
Ca^{2+} , мг/л	15,6	26,6	21,1	15,6	27,5	20,8	16,4	29,7	21,7
Mg^{2+} , мг/л	1,20	3,61	2,16	1,34	2,80	1,99	1,34	2,68	2,22
Жесткость, мг-экв./л	0,91	1,56	1,23	0,91	1,51	1,20	0,95	1,82	1,27
Общая минерализация, мг/л	78,5	124,6	102,6	77,9	124,6	101,6	79,4	127,0	103,4
Формула Курлова	$M_{0,10} \frac{\text{HCO}_3 \ 91 \ \text{SO}_4 \ 8 \ \text{Cl} \ 1}{\text{Ca}84 \ \text{Mg}14 (\text{Na} + \text{K}) \ 2}$			$M_{0,10} \frac{\text{HCO}_3 \ 90 \ \text{SO}_4 \ 8 \ \text{Cl} \ 2}{\text{Ca}86 \ \text{Mg}13 (\text{Na} + \text{K}) \ 2}$			$M_{0,10} \frac{\text{HCO}_3 \ 91 \ \text{SO}_4 \ 8 \ \text{Cl} \ 1}{\text{Ca}90 \ \text{Mg}9 (\text{Na} + \text{K}) \ 1}$		

По данным четырехлетних наблюдений установлено, что содержания элементов группы азота (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) в р. Чемал до и после водохранилища и в самом водохранилище очень малы. Концентрации аммонийного азота не превышали 0,05 мг N/л (предел обнаружения) в течение всего времени наблюдения. Единичные повышения концентраций NH_4^+ до 0,17 мг N/л в Чемальском водохранилище наблюдались в конце июня 1989 и середине июля 1992 гг. При этом концентрации в фоновом (р. Чемал до водохранилища) и контрольном (р. Чемал после водохранилища) створах в этот же период не превышали 0,05 мг N/л. Вероятно, такой скачок может быть связан с максимальной активизацией в придонной глубоководной части водохранилища процессов распада азотсодержащих органических веществ до ионов аммония с одновременным замедлением биохимических процессов его нитрификации в условиях максимального прогрева вод и минимального содержания растворенного O_2 (концентрация ионов NO_3^- в водах водохранилища в этот период резко снижалась и составляла 0,06–0,10 мг/л). Нельзя также исключить возможность поступления хозяйственно-бытовых отходов Чемальского санатория, расположенного на правом берегу Чемальского водохранилища и максимально укомплектованного отдыхающими в этот момент.

Содержание NO_3^- в водах Чемальского водохранилища превалировало над остальными формами азота, что указывает на интенсивные процессы нитрификации в водоеме в условиях избыточного кислородного насыщения. Среднее содержание NO_3^- составляло 0,1–0,5 мг N/л. Изменения концентраций нитратов в различные гидрологические фазы были обычными: максимальные приходились на период межени, минимальные – на период паводков. При этом концентрации нитритного азота были крайне низки и находились на уровне или ниже 0,007 мг N/л (предела обнаружения).

Содержание растворенных форм фосфора в водах Чемальского водохранилища было также

невелико и в основном находилось на уровне и ниже предела обнаружения (0,005 мг P/л). Повышение концентрации фосфора до 0,016 мг P/л зафиксировано нами в августе 1990 г., что, вероятно, можно связать с дополнительным его поступлением с водосборной площади во время ливневых дождей, характерных для этого сезона года. Отмеченное же в июле 1992 г. повышение концентрации фосфора до 0,015 мг P/л можно связать с активизацией внутриводоемных процессов разложения фосфорорганических соединений, так как концентрации общего фосфора в это время в фоновом и контрольном створах не превышали 0,005 мг P/л.

Кремний в водах Чемальского водохранилища находится в доминирующем положении – его содержание на один – два порядка превосходит содержания остальных биогенных элементов и в среднем составляет 3 – 4 мг/л.

В табл. 4 приведены минимальные, максимальные и средние концентрации нитратного азота и кремния за четырехлетний период. Невысокие концентрации биогенных элементов позволяют классифицировать воды изучаемого водоема как чистые и свидетельствуют о протекании активных биохимических процессов самоочищения посредством нитрификации и фотосинтеза. Этому благоприятствуют небольшая глубина водоема, высокая степень насыщения кислородом, регулирование объема воды водохранилища, минимальный вклад антропогенного загрязнения. Однако продолжающееся интенсивное развитие в этом районе горного туризма и стихийного полоничества отдыхающих может нарушить сложившееся геохимическое равновесие в Чемальском водохранилище и резко ухудшить качество его воды.

Органическое вещество. Наиболее важными показателями качества воды, связанными с загрязнением органическими веществами, являются ХПК, перманганатная окисляемость (ПО) и БПК₅.

Т а б л и ц а 4

Компонент	NO_3^- , мг N/л			Si, мг/л		
	min	max	средн.	min	max	средн.
До водохранилища	0,12	0,50	0,27	1,7	7,4	3,9
Водоохранилище	0,06	0,78	0,22	1,7	6,6	3,2
За водохранилищем	0,10	0,48	0,26	0,12	5,8	3,6

Т а б л и ц а 5

Место отбора	ХПК			ПО мгО/л			БПК ₅		
	min	max	средн.	min	max	средн.	min	max	средн.
р. Чемал до водохранилища	1,33	21,9	9,96	0,14	2,26	0,92	0,55	2,98	1,43
Чемальское водохранилище	0,76	19,7	12,3	0,08	2,09	0,52	0,50	4,17	1,76
р. Чемал после водохранилища	3,41	19,7	11,1	0,10	3,08	1,03	0,73	3,35	1,87

В табл. 5 приведены минимальные, максимальные и средние значения величин ХПК, ПО и БПК₅ за четырехлетний период наблюдения (1989–1992). Полученные данные показывают, что воды р. Чемал и водохранилища относятся к классу незагрязненных с малой окисляемостью (ПО < 2 мг О/л). Значения величин ХПК указывают на присутствие стойкого органического вещества в количествах, не превышающих допустимых значений (< 30 мг О/л). Показатель БПК₅ не превышает 2 мг О/л, что также позволяет оценить поверхностные воды исследуемого объекта как незагрязненные легкоокисляемой органикой.

Полученные данные свидетельствуют о том, что содержание С_{орг} в целом в водохранилище выше, чем в фоновом и контрольном створах реки. Это может быть результатом того, что образование и накопление органического вещества в толще вод Чемальского водохранилища идет не за счет стока реки, а главным образом за счет внутренних факторов, обусловливаемых непрерывными процессами синтеза и разложения первичного органического вещества. Внешние факторы, например, поступление загрязняющих веществ с прилегающей территории во время паводков и ливневых дождей, второстепенны и имеют сезонный характер. Повышенные относительно других створов концентрации органического вещества, определяемого по ПО и БПК₅, в нижнем бьефе водохранилища (контрольный створ) указывают на то, что легкоокисляемая органика по глубине водохранилища может быть стратифицирована (с концентрированием в верхнем слое воды), что при сработке водохранилища приводит к увеличению ее концентраций в контрольном створе.

Соотношения различных форм органического вещества в воде Чемальского водохранилища

и р. Чемал до и после водохранилища легко устанавливаются с помощью расчетных показателей ПО/С_{орг}, БПК₅/С_{орг} и БПК₅/ПО, значения которых приводятся в табл. 6. Величину С_{орг} определяли расчетным методом по формуле: С_{орг} = ХПК × 0,375, где 0,375 – отношение эквивалентов углерода и кислорода. Представленные в таблице величины показывают, что в поверхностных водах Чемальского водохранилища преобладают формы стойких к окислению органических веществ. Из легкоокисляемых форм, определяемых по ПО и БПК₅, преобладают органические вещества биологического происхождения, так как величина БПК₅/ПО > 1.

В 1992 г. нами проведены работы по определению С_{орг} в донных осадках и во взвешенном веществе. Небольшой фактический материал не позволяет проследить взаимосвязь и установить какие-либо закономерности между растворенным органическим веществом и органическим веществом донных отложений и взвешенных наносов. В табл. 7 приведены средние концентрации С_{орг} (мг/г) в донных отложениях (ДО) и во взвешенном веществе (ВВ) Чемальского водохранилища по результатам гидрохимической съемки 1992 г.

Сопоставление приведенных в табл. 7 данных показывает, что мелкие фракции донных осадков содержат большие количества С_{орг}, чем крупные, что объясняется большей удельной сорбционной площадью первых по сравнению с последними. Содержание С_{орг} во взвешенном веществе почти на порядок выше, чем в

Т а б л и ц а 6

Створ	С _{орг} , мг/л	ПО/ С _{орг}	БПК ₅ / С _{орг}	БПК ₅ / ПО
До водохранилища	3,74	0,24	0,38	1,50
Водоохранилище	4,61	0,11	0,38	3,39
После водохранилища	3,58	0,29	0,52	1,80

Т а б л и ц а 7

Створ	Май		ВВ	Июль		ВВ	Ноябрь		ВВ
	Фракции ДО, мм			Фракции ДО, мм			Фракции ДО, мм		
	1-0,25	< 0,25	1-0,25	< 0,25	1-0,25	< 0,25			
До водохранилища	3,49	5,76	28,1	2,53	4,79	31,8	11,01	12,38	33,2
Водохранилище	3,35	6,72	42,5	4,19	8,44	59,4	9,32	28,04	74,3
После водохранилища							21,2	30,5	

донных отложениях, что может быть связано как с меньшими размерами взвешенных частиц, так и с процессами минерализации органического вещества, происходящими в верхнем слое донных отложений.

Изучение неоднородности химического состава вод Чемальского водохранилища позволяет выявлять возможные источники поступления загрязняющих веществ, а также ранжировать участки водоема по качеству. Так, сопоставление содержания химических компонентов по вертикалям одного створа дает представление об их распределении по ширине водоема. Сравнение химического состава по нескольким створам показывает распределение химических веществ по длине водохранилища. В табл. 8 приведен химический состав поверх-

ностных вод Чемальского водохранилища по вертикалям всех наблюдаемых створов.

Сравнение химического состава воды внутри каждого створа по вертикалям показывает, что химические компоненты по ширине водохранилища распределены достаточно равномерно и различия между ними незначительны. Сравнение качества воды по створам выявляет тенденцию слабого уменьшения общей минерализации и концентрации всех определяемых главных ионов (кроме сульфат-ионов и Mg^{2+}) от верхнего створа к приплотинному, что напрямую может быть связано с процессами седиментации взвешенного вещества по мере прохождения воды через водохранилище. По данным табл. 8 четкой тенденции изменения газового режима и содержания органических веществ при продвижении от верхнего створа во-

Т а б л и ц а 8

Компонент	Верхний створ		Центральный створ		Створ у плотины	
	1	2	1	2	1	2
Т, °С	–	–	10,7	11,2	11,0	11,1
рН	7,99	8,03	8,12	8,21	7,97	7,90
Еh, мВ	+237	+233	+218	+247	+264	+261
О ₂ , мг/л	11,6	12,4	12,8	12,5	11,1	10,9
СО ₂ , мг/л	1,68	1,62	0,80	0,94	1,68	1,97
Жесткость, мг-экв/л	1,24	1,25	1,22	1,21	1,14	1,14
Са ²⁺ , мг/л	21,7	21,8	21,3	21,2	19,5	19,4
Мg ²⁺ , мг/л	1,93	1,86	1,92	1,89	2,12	2,09
Сl ⁻ , мг/л	0,78	0,79	0,64	0,65	0,68	0,66
НСО ₃ ⁻ , мг/л	75,0	74,7	74,3	73,8	72,1	72,0
SO ₄ ²⁻ , мг/л	4,52	4,54	5,30	5,42	5,45	4,60
NO ₃ ⁻ , мг/л	0,20	0,20	0,21	0,22	0,18	0,18
Si, мг/л	3,44	3,55	2,63	2,99	2,98	3,00
Общая минерализация, мг/л	101,5	101,8	101,9	101,4	99,8	98,7
ХПК	15,1	13,2	12,9	11,5	14,7	13,8
ПО	1,13	1,28	1,46	1,46	1,22	1,15

П р и м е ч а н и е. 1, 2 – вертикали.

дохранилища к приплотинному не прослеживается. Это может быть следствием того, что содержание органического вещества и растворенных газов в объеме водохранилища определяется не перераспределением поступивших со стоком реки и с водосборной площади их количеств, а внутриводоемными процессами синтеза и разложения первичного органического вещества. В целом же химический состав вод Чемальского водохранилища достаточно однороден, что объясняется небольшими величинами площади зеркала водохранилища, равномерным поступлением веществ с водосборной площади и малой антропогенной нагрузкой.

ВЫВОДЫ

1. Поверхностные воды Чемальского водохранилища по своему химическому составу относятся к классу слабоминерализованных, мягких, кальциево-гидрокарбонатного типа.

2. Газовый режим водохранилища характеризуется высоким содержанием растворенного

кислорода и незначительным содержанием диоксида углерода, сероводород отсутствует.

3. Содержание биогенных элементов в исследуемом водоеме невелико, а аммиачный и нитритный азот практически отсутствует, что указывает на активные процессы самоочищения внутри водоема. Превалирование иона NO_3 над остальными формами азота определяется протеканием достаточно интенсивных процессов нитрификации в водоеме в условиях избыточного кислородного насыщения.

4. Поверхностные воды Чемальского водохранилища относятся к водам малой окисляемости ($\text{ПО} < 5$), содержат незначительные количества трудноокисляемого органического вещества, которое преобладает над легкоокисляемой органикой.

5. Распределение химического состава по акватории водохранилища достаточно однородно и свидетельствует о фоновом равномерном поступлении химических веществ с площади водосбора.

Peculiarities of Hydrochemical Regime of the Chermal Reservoir (The Mountainous Altai, the Altai Republic)

T. S. PAPINA, E. I. TRETYAKOVA

Results of multiannual (1989–1992) studies of seasonal changes of gas regime, physico-chemical parameters, macrocomponent composition and organic substance content of surface waters of the Chermal reservoir are presented. The studies have shown that the chemical composition of waters is rather homogenous across the reservoir aquatory, which, in its turn, may witness to a uniform background supply of chemical compounds from the water catchment area. The biogenic element content is not high, and the prevalence of NO_3 ion over other forms of nitrogen is caused by intense nitrification processes. Seasonal changes of C_{org} in waters of the Chermal reservoir differ from those in non-regulated parts of the river and are determined by intrareservoir processes.