

УДК 556.114.6: 556.535.8

DOI 10.21285/0130-108X-2016-56-3-112-124

## ДИНАМИКА ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МАЛЫХ ПРИТОКОВ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ БРАТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© Н.А. Загорулько<sup>1</sup>, В.И. Полетаева<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Для выявления особенностей формирования состава воды рек Оса, Ида, Унга, Залари и залива Унга в 2013–2014 гг. на этих объектах были проведены гидрохимические исследования. Изучена пространственная динамика минерализации и концентраций главных ионов, биогенных компонентов и тяжелых металлов в воде рек и залива. Рассмотрены природные и антропогенные факторы трансформации состава речных вод. Установлено значительное увеличение минерализации речных вод по течению, вызванное поступлением сульфат-ионов и кальция из гипсовых пород, распространенных в бассейнах этих рек. Отмечено поступление хлорид-ионов и ионов натрия в воды рек Унга и Залари в средних частях их бассейнов с подземными водами, обогащенными этими элементами. Выявлено влияние притоков рек Унга и Залари на основной ионный состав воды залива Унга. В верхней части залива Унга отмечены концентрации фосфора, превышающие значения для Братского водохранилища. Содержание меди, цинка, кадмия и мышьяка в воде рек и залива Унга невелико и сопоставимо со средними уровнями значений для водохранилища, приводимых в литературе. Сопоставление современных и ранее опубликованных данных по сезонной динамике гидрохимического состава реки Унга выявило некоторые различия.

*Ключевые слова:* малые реки, гидрохимический состав, Братское водохранилище

**Формат цитирования:** Загорулько Н.А., Полетаева В.И. Динамика гидрохимического состава малых притоков верхней части Братского водохранилища // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 3 (56). С. 112–124. DOI 10.21285/0130-108X-2016-56-3-112-124.

## HYDROCHEMICAL COMPOSITION DYNAMICS OF THE BRATSK RESERVOIR UPPER PART MINOR TRIBUTARIES

N.A. Zagorulko, V.I. Poletaeva

Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a, Favorsky St., Irkutsk, 664033, Russia.

Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

Hydrochemical researches of the Osa, Ida, Unga, Zalari rivers and Unga bay were conducted in 2013–2014 in order to identify the formation features of their water composition. The spatial dynamics of total dissolved solids (TDS) have been studied as well as the concentrations of major ions, biogenic elements and heavy metals in the waters of rivers and the bay. Natural and anthropogenic factors of river water composition transformation are analyzed. Significant currentwise increase of TDS in river water is detected. It is the result of the income of  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Ca}^{2+}$  ions supplied by gypsum that is widespread in these river basins.  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  ions inflow the Unga and Zalari river waters in the middle parts of their basins with the underground waters enriched with these elements. Tributaries of the Unga and Zalari rivers are found to influence the main ionic composition of the Unga bay water. Phosphorus concentration in the water of the upper part of bay Unga exceeds the values characteristic for the

<sup>1</sup>Загорулько Наталья Анатольевна, младший научный сотрудник лаборатории экологической геохимии, e-mail: zagor@igc.irk.ru

Zagorulko Natalia, Junior Researcher of the Laboratory of Ecological Geochemistry, e-mail: zagor@igc.irk.ru

<sup>2</sup>Полетаева Вера Игоревна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории экологической геохимии Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, доцент кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых ИРНТУ, тел.: (3952) 511442, e-mail: alieva@igc.irk.ru

Poletaeva Vera, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher of the Laboratory of Ecological Geochemistry of the Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Associate Professor of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals of Irkutsk National Research Technical University, tel.: (3952) 511442, e-mail: alieva@igc.irk.ru

Bratsk Reservoir. Copper, zinc, cadmium and arsenic concentrations in the river water and bay Unga water are not high. They are comparable to the average Bratsk Reservoir levels reported in literature. Comparison of the contemporary and earlier published data on seasonal dynamics of the hydrochemical composition of the Unga river has revealed some differences.

*Key words: minor rivers, hydrochemical composition, Bratsk reservoir*

**For citation:** Zagorulko N.A., Poletaeva V.I. Hydrochemical composition dynamics of the Bratsk reservoir upper part minor tributaries. Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits. 2016. No. 3 (56). Pp. 112–124. DOI 10.21285/0130-108X-2016-56-3-112–124.

## Введение

Исследование гидрохимии малых рек имеет большое теоретическое и прикладное значение. Являясь притоками более крупных водных артерий, они участвуют в формировании и трансформации их гидрохимического состава. Влияние, которое оказывают притоки, может как носить локальный характер, так и простирается на значительные расстояния в водоемах, которые они питают. Кроме того, воды этих рек могут широко использоваться в хозяйственно-бытовых целях жителями населенных пунктов, расположенных по их берегам.

Многие ключевые факторы, оказывающие влияние на большинство водных систем, наиболее ярко проявляются на малых водотоках. Ведущую роль среди них играют природные составляющие: литология и геоморфология водосборного бассейна, климатические условия, грунтовые воды и т.д. Антропогенный вклад вносят мелиорация, агрокомплексы, животноводческие фермы, сточные воды малых предприятий и хозяйственно-бытовые стоки.

Реки Оса, Ида, Унга и Залари – малые притоки Братского водохранилища, созданного на Ангаре. Их бассейны расположены в степном малоувлажненном районе, где годовое количество атмосферных осадков составляет всего 300–500 мм [1]. Согласно исследованиям П.Ф. Бочкарева [2], эти реки представляют собой особую своеобразную группу: их вода относится к сульфатному классу, группе кальция и имеет высокую минерализацию. Таким образом, реки Оса, Ида, Унга и Залари кардинально отличаются по гидрохимиче-

скому составу от Братского водохранилища, воды которого относятся к гидрокарбонатному классу, группе кальция. Они могут оказывать влияние на состав воды заливов в районе их впадения.

В связи с этим целью данной работы является изучение пространственно-временной динамики главных ионов, биогенных компонентов и микроэлементов в водах рек Оса, Ида, Унга и Залари, а также оценка влияния притоков на гидрохимический состав залива Унга Братского водохранилища.

## Материалы и методы

В работе анализируются данные гидрохимических исследований, проведенных в 2013–2014 гг. на реках Оса, Ида, Унга и Залари в заливе Унга (рис. 1). Воды рек Оса и Ида отобраны в летний и осенний сезоны в двух пунктах (верховья и устья). Пространственная динамика гидрохимического состава рек Унга и Залари исследована более детально. В 2014 г. в сезон летней межени (конец июня) был произведен отбор проб в шести пунктах реки Унга и в пяти пунктах реки Залари. Кроме того, в этот период были исследованы некоторые притоки реки Унга. В п. У.3, У.4 и З.2 проводили опробование в различные гидрологические сезоны. Воды Братского водохранилища в сезон летней межени отбирали в восьми пунктах в заливе Унга и в одном пункте в русловой части.

Аналитические работы проводили в аккредитованном аналитическом центре ИГХ СО РАН. Определение главных ионов и биогенных компонентов состава вод ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_{4\text{общ}}^-$ )

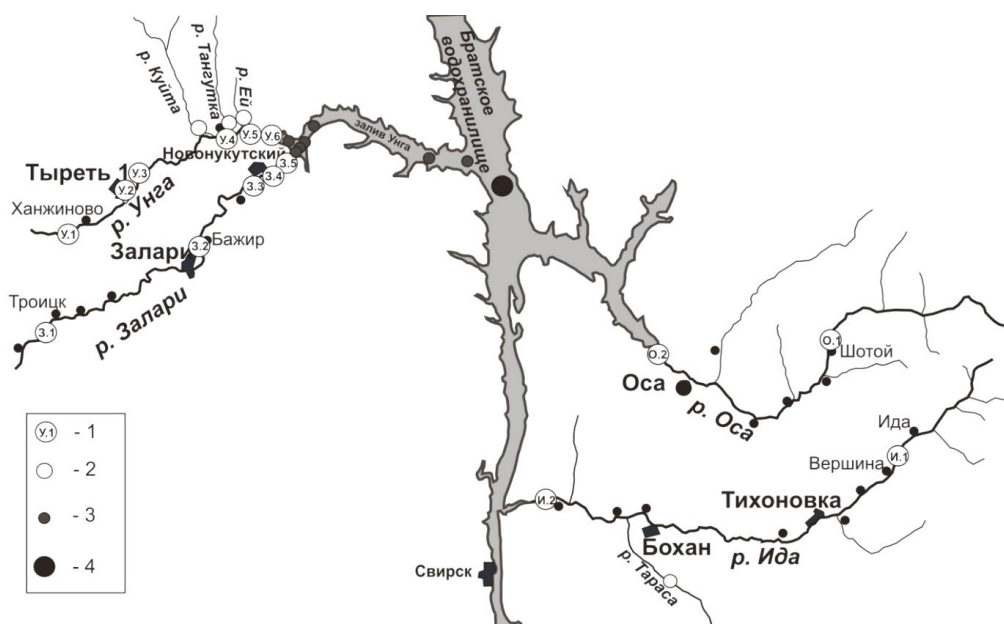


Рис. 1. Карта-схема пунктов отбора проб воды:

1 – на реках; 2 – на притоках рек; 3 – в заливе Унга; 4 – в русловой части Братского водохранилища

осуществляли с использованием стандартных методик [3]. Концентрации микроэлементов определяли масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре высокого разрешения Element-2 (Finnigan MAT, Germany).

#### Результаты и обсуждение

**Главные ионы.** Воды рек Ида, Оса, Унга и Залари, их притоков и залива Унга отличаются большой вариабельностью основного ионного состава и минерализации (табл. 1).

Низкая и средняя минерализация отмечается лишь для воды верхних

течений этих рек, реки Тараса (притока Иды) и нижнего участка залива Унга. Большая часть водных проб обладает повышенной минерализацией, а вода нижнего течения рек Залари и Унга имеют минерализацию более 1000 мг/дм<sup>3</sup>.

По показателю кислотности воды всех исследованных рек относятся к нейтральным и слабощелочным. Значение pH водных проб колеблется в пределах от 7,2 до 9,2. Наименьшие значения pH отмечаются в верхних течениях рек и нижней части залива Унга, наибольшие – на устьевых участках рек.

Таблица 1

Вариации основного ионного состава воды малых притоков, залива Унга и русловой части Братского водохранилища, мг/дм<sup>3</sup>

Объект	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	TDS*
р. Ида	134–142	1,3–1,8	20–151	38–98	4–9	0,7–1,2	3–4	206–403
р. Тараса	146	1,0	41	46	9	1,1	5	251
р. Оса	102–129	1,1–3,0	28–174	32–87	8–13	0,6–1,1	2–5	175–414
р. Унга	153–351	1–121	8–530	47–253	16–52	0,3–3,9	8–81	323–1112
Притоки р. Унга	216–324	1–33	45–470	43–204	22–49	0,9–2,7	9–30	338–1086
р. Залари	120–295	1,5–51	1,5–580	24–232	9–45	0,5–3,6	4–75	161–1127
Залив Унга	77–192	4–42	19–450	23–178	4–40	1,2–3,1	6–31	134–937
Братское вдхр.	87	2,6	16	19	4	1	4	136

\* – минерализация

Отличительной особенностью рек Оса, Ида, Унга и Залари является значительное увеличение минерализации по течению от верховий к устью. В правобережных притоках Братского водохранилища – р. Оса и Ида – сумма растворенных солей в летний период изменялась в 2–2,4 раза. В левобережных притоках эти изменения составили для реки Унга 3,4 раза, а для реки Залари 7 раз.

Основной вклад в увеличение минерализации вносит сульфат-ион, который в большом количестве привносится в воды реки из загипсованных пород верхоленской свиты, распространенных в нижних частях бассейнов этих рек [4]. В летний период в воде рек Оса и Ида концентрации сульфат-иона увеличивались на устьевых участках по сравнению с верховьями в 6,2 и в 7,6 раза соответственно. Для рек Унга и Залари увеличение содержаний сульфатов происходило на порядки – 63,8 и 386,7 раза соответственно. Пространственная динамика содержания сульфат-ионов в воде рек

Унга и Залари (рис. 2) свидетельствует о том, что основной привнос этого аниона происходит на нижних участках этих рек.

Вместе с сульфатами в воде рек повышаются концентрации кальция. Для рек Оса и Ида это увеличение составляет 2,7 и 2,6 раза соответственно. Для рек Унга и Залари – 5,4 и 9,7 раза соответственно (см. рис. 2).

На состав речных вод также влияет боковая приточность. Река Тангутка впадает в реку Унга с левого борта ниже пункта У.4. Ее вода в устье характеризуется значительно более низкой минерализацией, содержанием сульфат-ионов и кальция, что приводит к некоторому снижению этих показателей в воде реки Унга ниже ее впадения в залив (п. У.5).

Помимо природного поступления сульфат-иона в водоемы в воды реки Залари дополнительно поступает  $SO_4^{2-}$  от техногенных источников. В поселке Новонукутский расположен гипсовый завод ООО «Кнауф Гипс Байкал»,

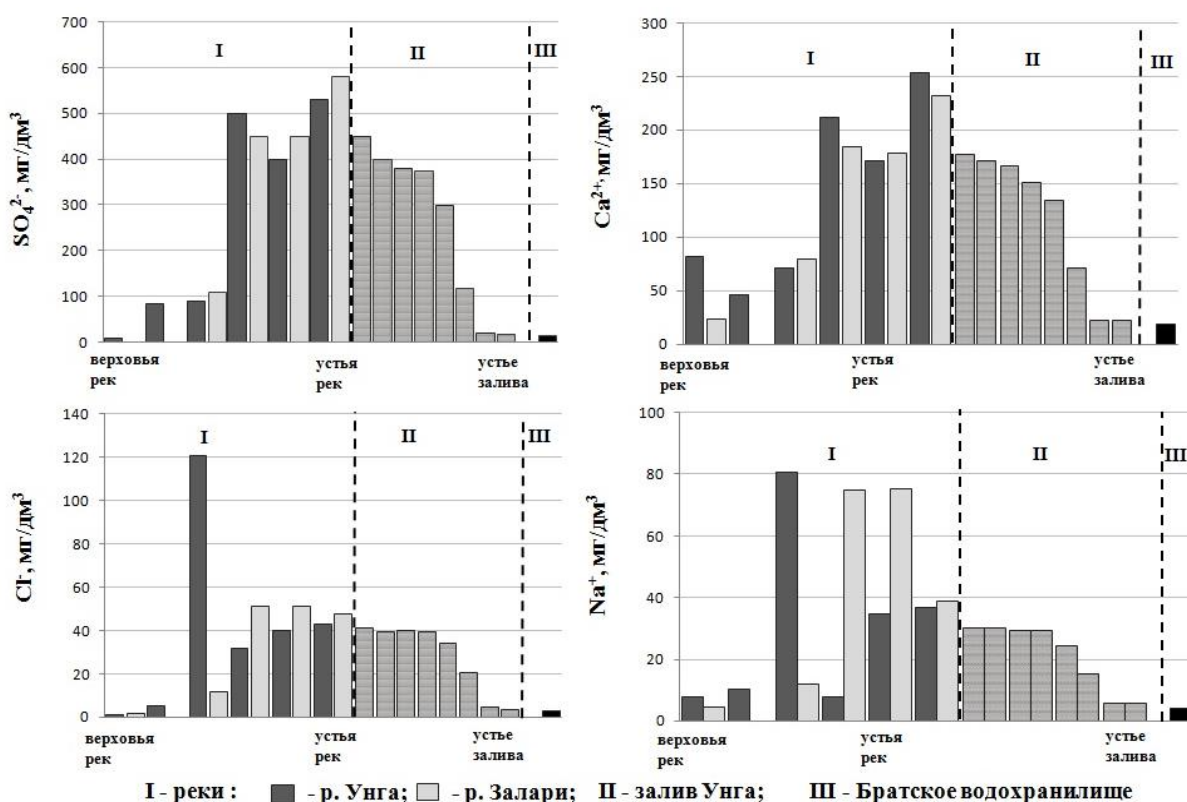


Рис. 2. Пространственная динамика концентраций сульфат-ионов, кальция, хлорид-ионов и натрия в воде рек Унга и Залари, залива Унга и русловой части Братского водохранилища

приуроченный к крупнейшему гипсовому месторождению, пылевые выбросы которого ветровым переносом распространяются в окрестностях поселка. На нижнем участке реки длиной 10 км (от пункта 3.4 до 3.5) сульфат-ион и кальций увеличиваются в эквивалентном соотношении:  $\text{SO}_4^{2-}$  на  $130 \text{ мг/дм}^3$  (2,7 мг-экв.),  $\text{Ca}^{2+}$  – на  $54 \text{ мг/дм}^3$  (2,7 мг-экв.), что указывает на единый источник их поступления.

Концентрации хлорид-ионов и натрия также имеют ярко выраженную пространственную динамику в воде рек Унга и Залари (см. рис. 2). Содержание этих компонентов в нижнем течении реки Залари значительно увеличиваются по сравнению с ее верховьями ( $\text{Cl}^-$  – в 33,3 раза,  $\text{Na}^+$  – в 17,3 раза). Источником их поступления служат подземные воды. В пробе воды из колодца в поселке Залари отмечены концентрации хлорид-ионов –  $91 \text{ мг/дм}^3$  и натрия –  $74 \text{ мг/дм}^3$  при величине минерализации  $1530 \text{ мг/дм}^3$ . В подземной воде со сходным значением минерализации ( $1526 \text{ мг/дм}^3$ ), отобранной в деревне Красное Поле (расположена в 5 км от поселка Залари ниже по течению реки Залари), обнаружены значительно более высокие содержания этих компонентов –  $248 \text{ мг/дм}^3$  ( $\text{Cl}^-$ ) и  $174 \text{ мг/дм}^3$  ( $\text{Na}^+$ ).

В воде среднего течения реки Унга (п. У.3) наблюдается резкое повышение концентраций хлорид-ионов и натрия. Рост содержания этих ионов происходит практически в эквивалентном соотношении  $\text{Cl}^-$  – на 3,38 мг-экв,  $\text{Na}^+$  – на 3,18 мг/экв. В зимний период, когда питание реки осуществляется только за счет грунтовых вод, в этом районе река Унга промерзает почти до дна. Слабый водный поток, текущий по дну, имеет очень высокую минерализацию ( $9185 \text{ мг/дм}^3$ ), основную часть которой составляют хлориды ( $4620 \text{ мг/дм}^3$ ) и натрий ( $2968 \text{ мг/дм}^3$ ). Судя по величине хлор-бромного отношения ( $\text{Cl}/\text{Br} = 3600$ ), генезис этих вод связан с растворением каменной соли [5]. Пункт опробования расположен недалеко от Тыретьского

солерудника, где ведется разработка пластов каменной соли усольской свиты (нижний кембрий). Поэтому привнос хлорид-ионов и натрия на этом участке в воды Унги с грунтовыми водами, обогащенными растворенной каменной солью, очевиден. Ниже по течению концентрации этих ионов значительно снижаются, хотя их значения остаются более высокими, чем в верховьях реки.

В заливе Унга происходит смешение высокоминерализованных вод рек Унга и Залари с водами Ангары. В результате разбавления происходит уменьшение концентраций сульфат-, хлорид-ионов, кальция, натрия и величины минерализации от верхней части залива к устью, где отмечается их незначительное превышение по сравнению с русловой частью Братского водохранилища (см. рис. 2).

В отличие от левых притоков в водах правых притоков – рек Оса и Ида – концентрации хлорид-ионов и натрия по течению изменяются незначительно.

Пространственная динамика  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  в воде изучаемых рек выражена в меньшей степени. Для рек Оса и Ида в летний период наблюдалось незначительные повышения по течению концентраций ионов калия (в 1,8 и 1,6 раза соответственно) и ионов магния (в 2,7 и 2,6 раза). Концентрации гидрокарбонат-ионов оставались практически неизменными.

В реке Унга было отмечено снижение концентрации гидрокарбонат-ионов в районе Тыретьского пруда (п. У.2) в 2,3 раза по сравнению с ее значением в верховьях реки ( $351 \text{ мг/дм}^3$ ). Далее отмечался постепенный рост гидрокарбонатов по течению до пункта У.5. Концентрация ионов магния в пунктах У.4 и У.5 были повышены в 3 раза относительно значений для верхних участков реки. В воде реки Залари наблюдалось увеличение содержания гидрокарбонатов и магния в среднем течении в 2,4 и 3,6 раза соответственно, которое сохранялось вплоть до устья.

На устьевых участках рек Унга и Залари (п. У.6 и 3.5) концентрации гидрокарбонат-ионов несколько снижаются. В этих пунктах также отмечены наиболее высокие значения рН (9,2 и 8,2 соответственно), при которых карбонатное равновесие смещается в сторону образования карбонатных ионов [6]. При достаточно высоких содержаниях ионов кальция в воде на этих участках рек карбонатные ионы выводятся из водной среды путем осаждения  $\text{CaCO}_3$ .

Ввиду таких значительных изменений содержания главных ионов в воде рек Оса, Ида, Унга и Залари происходит кардинальное изменение их относительного состава. Вода верховьев всех рек относится к гидрокарбонатному классу группы кальция. На долю гидрокарбонат-иона в реках Оса и Ида приходится 73 и 83%-экв. анионов соответственно, а в реках Унга и Залари она достигает 97 и 96%-экв. соответственно. Преимущественно гидрокарбонатный состав воды верхних течений рек Унга и Залари обусловлен распространением в этих частях их бассейнов пород заларинской свиты (юрская система), состав которых характеризуется присутствием кварца, полевых шпатов, микрокварцита, обломков аргиллитов и с глинисто-карбонатным, слюдисто-глинистым, глинисто-хлоритовым цементом. Доля кальция в воде рек колеблется от 56%-экв. катионов в реке Залари до 71%-экв. в реке Унга. По течению рек в их водах происходит

снижение доли гидрокарбонат-иона, а на доминирующие позиции выходит сульфат-ион. В устьевых частях рек его доля составляет: для реки Оса – 62%-экв. анионов, для реки Ида – 57%-экв., для реки Унга – 69%-экв., для реки Залари – 73%-экв. Среди катионов преобладающим остается кальций, и доля его увеличивается до 70–90%-экв.

Доли хлорид-ионов и щелочных металлов ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) в воде рек Оса и Ида малы и составляют 0,9–1,3%-экв. анионов и 4–5%-экв. катионов соответственно. Их значения по течению рек изменяются незначительно. В воде реки Залари от верховий к устью происходит увеличение относительного содержания  $\text{Cl}^-$  (от 2 до 9%-экв.) и суммы щелочных металлов (от 8 до 21%-экв.). В самом устье (п. 3.5) доли этих ионов снижаются, по-видимому из-за влияния вод залива. Особенно это снижение выражено для катионов натрия.

В воде реки Унга динамика относительного состава носит более сложный характер (рис. 3). В среднем течении (п. У.3) значительно возрастают доли хлорид-ионов и натрия, в результате чего вода на этом участке относится к сульфатно-хлоридному классу натриево-кальциевой группы. Ниже по течению относительное содержание этих ионов снижается и вода становится сульфатно-кальциевой, как и в других рассматриваемых реках.

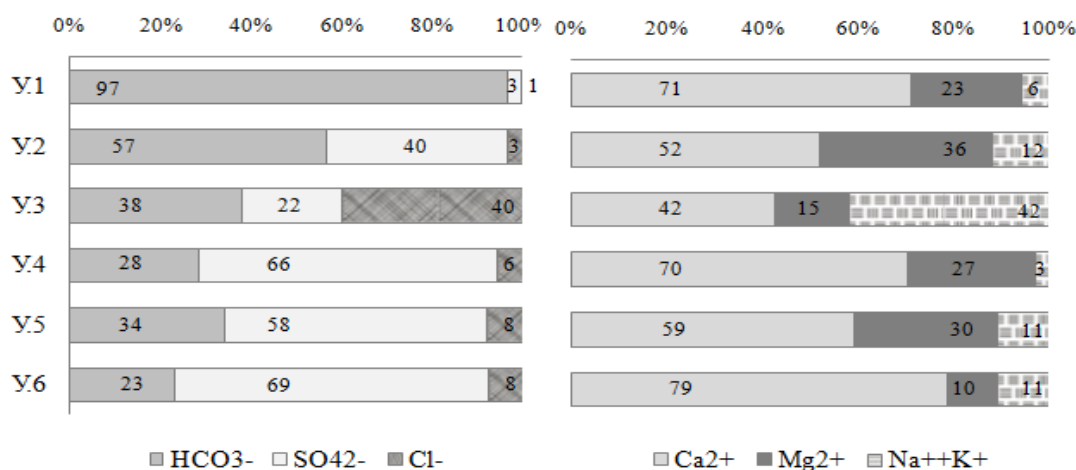


Рис. 3. Пространственная динамика относительного ионного состава воды реки Унга (условные обозначения см. на рис. 1)

В заливе Унга относительный состав воды изменяется от сульфатного кальциевого в верхней части залива до гидрокарбонатного кальциевого в устье. Доля гидрокарбонат-ионов увеличивается от 23 до 71%-экв. анионов, а доли сульфат-ионов и хлорид-ионов снижаются от 68 до 22%-экв. и от 9 до 6%-экв. соответственно. Однако относительный анионный состав в устье залива все же остается несколько отличным от анионного состава русловой части Братского водохранилища (доли  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  составляют 78, 4, 18%-экв. соответственно).

Доминирующим катионом в воде залива Унга является кальций. Его доля изменяется в пределах 65–71%-экв. катионов. Далее идут магний 16–24%-экв., натрий 10–15%-экв. и калий 0,6–1,7%-

экв. Катионная композиция характеризуется последовательным увеличением доли щелочных элементов и хаотичными колебаниями долей кальция и магния. В устье залива Унга катионный состав воды близок к воде русловой части Братского водохранилища (доли  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  составляют 64, 22, 12, 2%-экв. катионов соответственно).

Сезонная динамика основного ионного состава реки Унга в нижнем течении была детально изучена П.Ф. Бочкаревым в 1949–1951 гг. [2]. Нами были получены данные по гидрохимическому составу реки Унга для п. У.4 в различные сезоны (март, май, июль, август, октябрь). Сопоставление полученных нами данных с данными П.Ф. Бочкарева выявило некоторые различия (рис. 4).

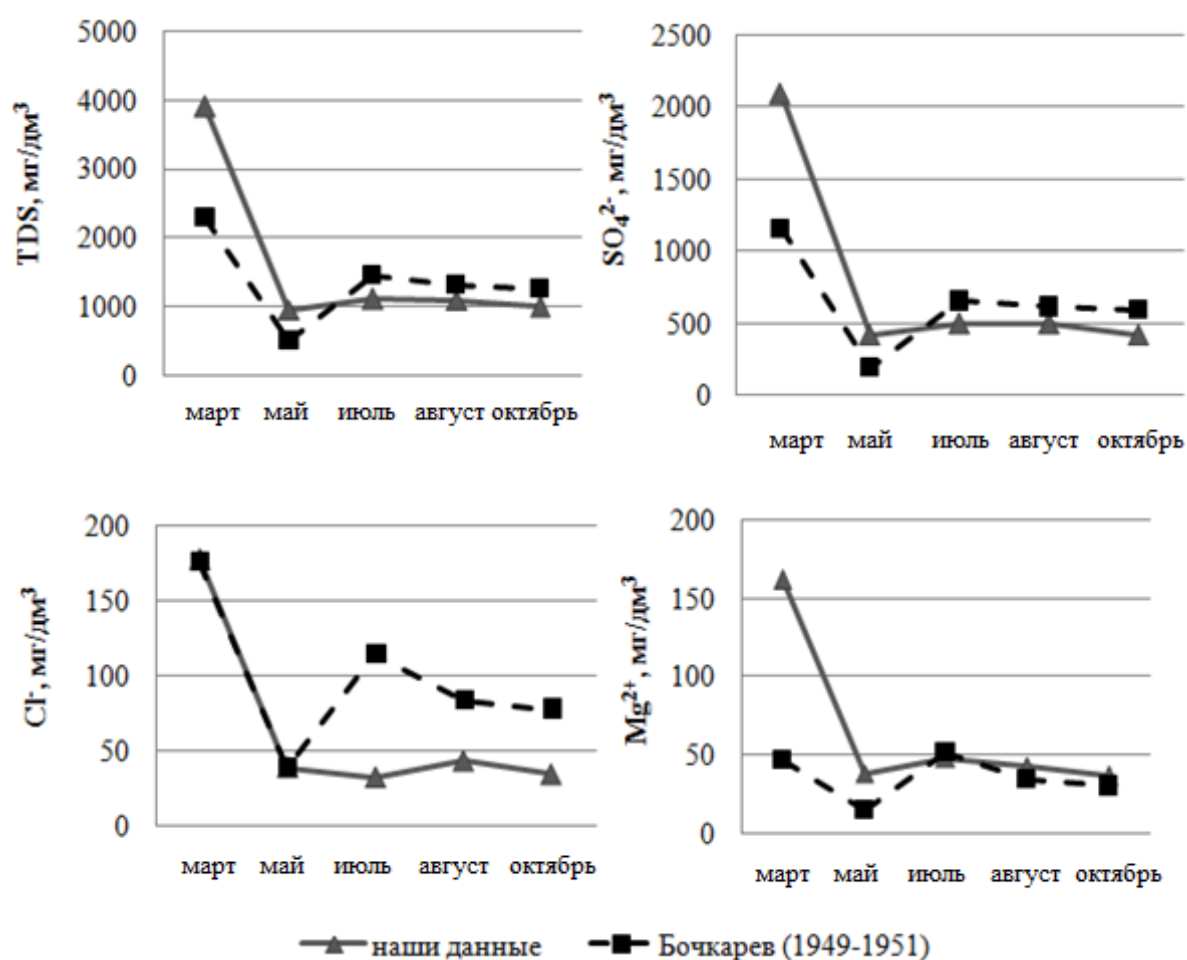


Рис. 4. Сезонная динамика (март, май, июль, август, октябрь) минерализации и концентраций сульфат-, хлорид-ионов и магния в нижнем течении реки Унга



Максимумы минерализации и концентраций главных ионов приходятся на период зимней межени (март). Однако значения, полученные нами, превышают уровни 1949–1951 гг. Наибольшее различие (почти в 3,5 раза) наблюдается для ионов магния.

В сезон весеннего половодья (май) концентрации всех главных ионов и минерализация снижаются до годового минимума. В последующий период (до июля), по данным П.Ф. Бочкарева, отмечался заметный рост этих показателей, после чего их значения вплоть до осенней межени незначительно уменьшались. Наиболее выражена эта динамика для содержания хлорид-ионов. По нашим данным, с мая и до октября изменения минерализации и концентраций всех главных ионов были несущественны, а их значения в большинстве случаев были несколько ниже полученных П.Ф. Бочкаревым. В сезоны летней и осенней межени этих двух временных периодов для хлорид-ионов отмечаются наибольшие отличия концентраций (в 2–3,6 раза), а концентрации магния сопоставимы.

Такие различия могут быть связаны с тем, что данные 1949–1951 гг. получены в период, предшествующий строительству Братской ГЭС и созданию Братского водохранилища. После наполнения водохранилища нижний участок русла реки был затоплен и устье сместилось выше по течению, поэтому между пунктами отбора должно быть значительное расстояние. Река Залари до затопления была притоком реки Унга и оказывала влияние на ее гидрохимический состав. Кроме того, при наполнении водохранилища и формировании подпора происходит инфильтрация речных вод вглубь берегов, что приводит к изменениям в составе и режиме уровня подземных вод, питающих реку [7].

Полученные нами данные по основному ионному составу рек Оса, Ида, Унга и Залари и залива Унга были сопоставлены с санитарными нормами для водных объектов хозяйственно-

питьевого и рыбохозяйственного (РБХ) значения [8, 9]. Величины всех рассматриваемых показателей для воды верхний изученных рек и нижней части залива Унга в летний период соответствуют установленным нормам. В нижнем течении рек концентрации сульфат-ионов в некоторых пробах воды (п. У.4, У.6, 3.5) находятся на уровне или превышают ПДК для вод хозяйственно-питьевого и культурно-бытового значения (500 мг/дм<sup>3</sup>) и во всех пробах превышают ПДК<sub>РБХ</sub> (100 мг/дм<sup>3</sup>). Вода верхней части залива Унга также не соответствует нормативам для водоемов рыбохозяйственного значения по содержанию сульфатов. Кроме того, на нижних участках рек Унга и Залари наблюдается превышение ПДК<sub>РБХ</sub> для ионов магния (40 мг/дм<sup>3</sup>).

**Биогенные ионы.** Концентрации биогенных элементов в воде изученных рек и залива Унга колеблются в широких пределах (табл. 2). В большинстве проб их содержание не превышает установленных санитарных норм для водных объектов хозяйственно-бытового и рыбохозяйственного значения [8, 9].

Наибольшие значения концентраций нитрат-ионов в реках Унга и Залари отмечались в пробах, отобранных в период зимней межени. Их значения составляют 1,25 и 2,20 мг/дм<sup>3</sup> для п. У.3 и У.4 (река Унга) соответственно и 3,40 мг/дм<sup>3</sup> для п. 3.2 (река Залари). В другие сезоны в этих и других пунктах опробования содержание нитрат-ионов, как правило, не превышали значения 0,90 мг/дм<sup>3</sup>. Исключение составляет проба воды рекуи Унга в п. У.3, отобранная в августе 2013 г., в которой была отмечена максимальная концентрация NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - 5,40 мг/дм<sup>3</sup>.

Концентрации нитрит-ионов в воде рек Оса, Ида, Унга и Залари незначительны и в большинстве случаев составляют тысячные доли мг/дм<sup>3</sup>. Высокие значения характерны для зимнего периода: для реки Унга в п. У.3 и У.4 они составляют 1,217 и 0,936 мг/дм<sup>3</sup> соответственно, а для реки Залари – в п. 3.2 –



Таблица 2

**Вариации содержания биогенных ионов в воде малых притоков, залива Унга и русловой части Братского водохранилища, мг/дм<sup>3</sup>**

Объект	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> общ
р. Оса	<0,05–0,52	<0,002–0,050	0,02–0,06	0,013–0,059
р. Ида	<0,05–0,58	<0,002–0,006	0,01–0,03	0,028–0,098
р. Унга	0,12–5,40	<0,002–1,217	0,02–3,81	0,043–1,254
Притоки р. Унга	0,20–0,90	0,390–1,061	<0,005–0,080	0,152–0,236
р. Залари	0,12–3,40	<0,002 – 0,546	0,01–0,10	0,059–0,197
Залив Унга	0,09–0,16	0,001–0,017	0,005–0,175	0,022–0,106
Братское вдхр. [10]	0,20	0,010	0,18	0,037
Братское вдхр. [11]	0,31	0,005	0,05	0,024
ПДК	45,00	3,30	2,00	3,50
ПДКрбх	40,00	0,08	0,50	0,05

0,546 мг/дм<sup>3</sup>. Кроме того, были отмечены концентрации NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, превышающие ПДКрбх в июле 2014 г. в воде реки Унга (в п. У.3 – 0,936 мг/дм<sup>3</sup>, У.4 – 0,406 мг/дм<sup>3</sup>) и ее притоках (реки Тыреть, Куйта, Тангутка, Ей).

Содержание ионов аммония в основной массе водных проб составляет сотые доли мг/дм<sup>3</sup>. Повышенные относительно ПДК и ПДКрбх концентрации NH<sub>4</sub><sup>+</sup> выявлены в реке Унга (п. У.3) в августе 2013 г. и феврале 2014 г. и составляют 2,46 и 3,81 мг/дм<sup>3</sup> соответственно. Пространственная динамика этих ионов в воде рек Унга и Залари в июне 2014 г. выражена довольно отчетливо. Наиболее высокие содержания ионов аммония отмечались в верховьях рек. На этих участках русла рек Унга и Залари заболочены и привнос NH<sub>4</sub><sup>+</sup> может осуществляться с болотными водами, в которых он может восстанавливаться из нитрат-ионов [6]. Далее по течению концентрации ионов аммония в речных водах постепенно снижались. Этому способствуют процессы нитрификации, переводящие аммонийный формы азота в нитритные и нитратные, а также разбавление речных вод притоками и грунтовыми водами. В устье реки Залари содержание аммония резко увеличивается, что вызвано заболоченностью этого участка. В сезонном отношении не выявлено каких-либо явных зависимостей в содержании NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

Общий фосфор (в пересчете на PO<sub>4</sub>) в воде изученных рек содержится в количествах, не превышающих ПДК для водных объектов хозяйственно-питьевого значения, а также ПДКрбх для мезотрофных (0,46 мг/дм<sup>3</sup>) и эвтрофных (0,61 мг/дм<sup>3</sup>) водоемов. Повышенные концентрации отмечались лишь в период зимней межени в воде реки Унга в п. У.3 и У.4 и составляют 0,90 и 1,25 мг/дм<sup>3</sup> соответственно. В летний период наибольшие содержания фосфатов (0,20–0,24 мг/дм<sup>3</sup>) отмечены для притоков рек Унга и Залари в п. 3.2. Поступление фосфора в речные воды очевидно связано с антропогенным влиянием поселков и деревень, расположенных по их берегам. Однако незначительные на первый взгляд содержания фосфатов в водах изученных рек превышают значения для реки Ангары и Братского водохранилища в несколько раз.

В воде залива Унга содержание азотистых соединений незначительно и не выходит за пределы установленных санитарных норм. В большинстве проанализированных проб концентрации нитрат-ионов, нитрит-ионов и аммония находятся на уровне или ниже значений, приводимых в литературе для воды Братского водохранилища [10, 11]. Содержание фосфора в воде верхней части залива Унга повышено относительно значений для водохранилища и ПДКрбх,

что объясняется влиянием рек Унга и Залари.

**Микроэлементы.** Концентрации тяжелых металлов и мышьяка в воде рек и залива Унга невелики и варьируют в пределах 1–2 порядков (табл. 3). Наибольшие вариации в содержании этих элементов отмечаются для рек Унга и Залари. Для вод реки Залари нет явной приуроченности повышений концентраций Cu, Zn, As, Cd, Hg и Pb к гидрологическим сезонам, в то время как в воде реки Унга максимальные содержания этих элементов фиксируются в зимний период.

В пространственном распределении тяжелых металлов и мышьяка в речных водах отмечается ряд особенностей. В летний период в воде рек Оса и Ида концентрации тяжелых металлов и мышьяка на устьевых участках рек превышали их значения в верховьях рек. Наибольшие различия наблюдались для цинка в реке Оса (в 6,0 раз) и кадмия в реке Оса (в 7,2 раза) и реке Ида (в 4,5 раза). Увеличение содержания

остальных элементов по течению этих рек составляло менее чем 3 раза. Наименьшей пространственной изменчивостью характеризуются содержания ртути (1,1 раза). Такая динамика содержания тяжелых металлов в воде рек Оса и Ида может объясняться антропогенным влиянием деревень и поселков, расположенных по берегам этих рек.

В воде рек Унга и Залари пространственная динамика рассматриваемых элементов носит иной характер. Наибольшие содержания тяжелых металлов установлены для воды верховий этих рек, что, возможно, вызвано грунтовым питанием. Максимум содержания цинка в воде реки Унга наблюдается в Тыретском водохранилище (п. У.2). Ниже по течению концентрации этих элементов значительно снижаются. В воде реки Залари происходит уменьшение содержания меди в 26 раз, цинка – в 59 раз, свинца – в 25 раз. В реке Унга наибольшие изменения отмечены для свинца – в 16 раз.

Таблица 3

**Содержание тяжелых металлов и мышьяка в воде малых притоков, залива Унга и русловой части Братского водохранилища, мкг/дм<sup>3</sup>**

Объект	Элемент					
	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
р. Оса	<u>0,4–2,6</u> 1,7	<u>0,7–4,2</u> 2,5	<u>0,3–0,8</u> 0,6	<u>0,02–0,12</u> 0,07	<u>0,05–0,24</u> 0,12	<u>0,0013–0,0022</u> 0,0019
р. Ида	<u>0,4–3,5</u> 2,0	<u>1,0–2,1</u> 1,6	<u>0,2–0,9</u> 0,6	<u>0,01–0,08</u> 0,05	<u>&lt;0,03–0,09</u> 0,05	<u>0,0017–0,0020</u> 0,0018
р. Залари	<u>0,4–10,8</u> 2,2	<u>0,4–26,6</u> 4,1	<u>0,5–2,0</u> 1,0	<u>0,01–0,25</u> 0,06	<u>0,03–0,67</u> 0,15	<u>0,0005–0,0034</u> 0,0014
р. Унга	<u>0,4–3,2</u> 1,1	<u>0,1–9,3</u> 2,3	<u>0,7–3,0</u> 1,6	<u>0,01–0,15</u> 0,06	<u>&lt;0,03–0,31</u> 0,11	<u>0,0005–0,0025</u> 0,0013
Притоки р. Унга	<u>0,4–0,6</u> 0,5	<u>0,1–1,1</u> 0,6	<u>1,1–1,4</u> 1,2	<u>0,01–0,10</u> 0,06	<u>&lt;0,03–0,04</u> 0,02	<u>0,0016–0,0028</u> 0,0022
Залив Унга	<u>0,6–1,7</u> 0,8	<u>0,3–2,1</u> 0,9	<u>0,4–1,2</u> 0,9	<u>0,02–0,11</u> 0,06	<u>&lt;0,03–0,30</u> 0,10	<u>0,0006–0,0014</u> 0,0009
Братское вдхр., русловая часть	0,8	1,1	0,4	0,04	<0,03	0,0008

Примечание: в числителе – пределы концентраций, в знаменателе – среднее значение.

Мышьяк в воде верхних течений рек Унга и Залари присутствует в наименьших количествах. В средних частях бассейнов этих рек происходит увеличение его содержания в 2,3 раза (река Унга, п. У.3) и в 2,7 (река Залари, п. 3.2). Ниже по течению концентрации мышьяка немного снижаются (в п. У.4 и 3.3) и далее остаются практически неизменными вплоть до устьевых участков рек.

Сопоставление микроэлементного состава проб воды рек и залива Унга с установленными нормативами выявило несколько случаев превышения ПДКрбх по меди и цинку. Повышенные содержания меди (более 1 мкг/дм<sup>3</sup>) отмечались в воде рек Оса и Ида, в верховьях рек Унга и Залари, а также в п. У.3 и У.4 в зимний период и в пункте 3.2 во все сезоны, кроме осени. В одной из проб воды залива Унга концентрация этого элемента составила 1,7 мг/дм<sup>3</sup>. Для цинка был зарегистрирован единичный случай превышения ПДКрбх (10 мкг/дм<sup>3</sup>) в пункте 3.1 (р. Залари), где содержание элемента в летний период превысило допустимый уровень в 2,7 раза.

Содержание тяжелых металлов и мышьяка в речных водах и воде залива Унга были сопоставлены с их содержанием в русловой части Братского водохранилища (см. табл. 3). Выявлено, что средние концентрации всех рассматриваемых элементов в притоках выше, чем в русловой части водохранилища. Влияние микроэлементного состава притоков на состав воды залива Унга явно прослеживается в повышенных концентрациях мышьяка в верхней части залива, которые постепенно уменьшаются к устью. Повышенные концентрации свинца в воде на всем протяжении залива Унга свидетельствуют о дополнительном его поступлении как от природных, так и от техногенных источников.

#### **Заключение**

В результате проведенных исследований получены данные по гидрохимическому составу рек Оса, Ида, Унга, Залари. Выявлена значительная пространственная вариабельность

макрокомпонентного состава речных вод, что обусловлено особенностями геологического строения бассейнов рек. Значительное увеличение минерализации воды по течению рек вызвано поступлением сульфат-ионов и кальция из загипсованных пород верхоленской свиты, слагающих бассейны рек Оса и Ида и нижние части бассейнов рек Унга и Залари. В результате происходит смена класса речных вод от гидрокарбонатного кальциевого в верховьях до сульфатного кальциевого в нижних течениях. Кроме того, на состав воды рек Унга и Залари заметное влияние оказывают залежи каменной соли, выраженные в обогащении их вод ионами хлора и натрия в средних частях бассейнов. Различия в сезонной динамике основного ионного состава воды нижнего течения реки Унга современного периода и данных 1950-х годов отражают изменение природной среды после строительства Братской ГЭС. Пространственная динамика биогенных компонентов и микроэлементов связана с природным (подземное питание рек, заболоченность территорий, процессы нитрификации) и антропогенным (хозяйственно-бытовые стоки деревень и поселков) воздействием.

Кардинально отличаясь от маломинерализованных вод Братского водохранилища гидрокарбонатно-кальциевого состава, его притоки (Унга и Залари) оказывают влияние на состав воды залива Унга. В большей степени это отражается в повышенных концентрациях сульфат-ионов, ионов хлора и натрия в воде верхней части залива, которые к устью залива нивелируются до их значений по русловой части водохранилища. Таким образом, проведенные исследования показали, что воздействие притоков на гидрохимический состав Братского водохранилища носит локальный характер и распространяется только в пределах залива.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-05-00891-а и проекта РАН № 69.1.6.*

## Библиографический список

1. Беркин Н.С., Филиппова С.А., Бояркин В.М. [и др.]. Иркутская область (природные условия административных районов). Иркутск: Изд-во ИГУ, 1993. 304 с.
2. Бочкарев П.Ф. Гидрохимия рек восточной Сибири. Иркутск: Вост. Сиб. изд-во, 1959. 156 с.
3. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / под ред. А. Д. Семенова. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 540 с.
4. Геология СССР. Т. 17. Иркутская область. Ч.1. Геологическое описание. М: Гос. изд-во лит-ры по геологии и охране недр, 1962. 525 с.
5. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. М.: ЦентрЛитНефтеГазб, 2012. 672 с.
6. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометиздат, 1970. 444 с.
7. Овчинников Г.И., Павлов С.Х., Тржцинский Ю.Б. Изменение геологической среды в зонах влияния Ангаро-Енисейских водохранилищ. Новосибирск: Наука, 1999. 254 с.
8. О введении в действие ГН 2.1.5.1315 – 03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: постановл. от 30.04.2003 г. № 78.
9. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: Приказ федерального агентства по рыболовству от 18.01.2010 г.
10. Карнаухова Г.А. Гидрохимия Ангары и водохранилищ ангарского каскада // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 72–80.
11. Алиева В.И., Пастухов М.В. Гидрохимическая характеристика реки Ангары в зоне влияния Усольского промышленного узла // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 68–73.

## References

1. Berkin N.S., Filippova S.A., Bojarkin V.M. *Irkutskaja oblast' (prirodnye uslovija administrativnyh rajonov)* [Irkutsk region (natural conditions of the administrative districts)]. Irkutsk, IGU Publ., 1993. 304 p.
2. Bochkarev P.F. *Gidrohimiya rek vostochnoj Sibiri* [Hydrochemistry of rivers in eastern Siberia]. Irkutsk, Vost. Sib. Publ., 1959. 156 p.
3. Semenov A.D. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi* [Handbook of ground surface water chemical analysis]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1977. 540 p.
4. *Geologija SSSR*. T. 17. Irkutskaja oblast'. Ch.1. Geologicheskoe opisanie. [USSR Geology. V. 17. Irkutsk region. Part 1. Geological description] Moscow, Gos. izd-vo lit-ry po geologii i ohrane nedr Publ., 1962. 525 p.
5. Krajnov S.R., Ryzhenko B.N., Shvec V.M. *Geohimija podzemnyh vod* [Geochemistry of underground waters]. Moscow, CentrLitNefteGazb Publ., 2012. 672 p.
6. Alekin O.A. *Osnovy gidrohimii* [Basics of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1970. 444 p.
7. Ovchinnikov G.I., Pavlov S.H., Trzhcinskij Ju.B. *Izmenenie geologicheskoy sredy v zonah vlijaniya Angaro-Enisejskih vodohranilishh* [Change of geological environment in the zones affected by Angara-Yenisei reservoirs]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999. 254 p.
8. *O vvedenii v deistvie GN 2.1.5.1315 – 03. Predel'no dopustimye*

*kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob"ektov khozyaistvenno-pit'evogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya: postanovlenie ot 30.04.2003* [Enactment on ГН 2.1.5.1315 – 03 implementation. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in the water of the reservoirs of economic-drinking and cultural and amenity water use].

9. *Ob utverzhdenii normativovkachestva vody vodnykh ob"ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya, v tom chisle normativy predel'no dopustimykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob"ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya: Prikaz federal'nogo agentstva po rybolovstvu ot 18.01.2010* [On adoption of water quality standards for fishery water bodies including the standards of

maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies: Order of the Federal Agency for Fishery of 18 January 2010].

10. Karnauhova G.A. *Gidrohimiya Angary i vodohranilishh angarskogo kaskada* [Hydrochemistry of the Angara river and Angara cascade reservoirs]. *Vodnye resursy* [Water resources], 2008, V. 35, no. 1, pp. 72–80.

11. Alieva V.I, Pastuhov M.V. *Gidrohimicheskaja harakteristika reki Angary v zone vlijaniya Usol'skogo promyshlennogo uzla* [Hydrochemical characteristics of the Angara river in the area of influence of the Usoliye industrial center]. *Geografija i prirodnye resursy* [Geography and natural resources], 2012, no. 1, pp. 68–73.

*Статья поступила 22.06.2016 г.*

*Article received 22.06.2016.*