

## ГИДРОГЕОЛОГИЯ

УДК 556.314

**Современный химический состав вод озер зоны сочленения Уфимского вала и Предуральяского прогиба****В.Н. Катаев, Е.Н. Копанцева, И.Г. Ермолович**

Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

E-mail: kataev@psu.ru; elena.korotaeva.88@mail.ru; ermol@psu.ru

*(Статья поступила в редакцию 4 июня 2017 г.)*

Выполнена оценка современного гидрохимического состояния озер, расположенных в Кишертско-Суксунском карстовом районе Пермского края. Район в геолого-структурном отношении соответствует узкой контактной зоне карбонатов Уфимского вала (восточная окраина Восточно-Европейской платформы) и терригенных пород западной окраины Предуральяского прогиба. Результаты исследований позволяют существенно дополнить концептуальную гидрохимическую модель этого сложного по геолого-гидрогеологическому строению района.

Ключевые слова: *карст, карстовые озера, химический состав.*

DOI: 10.17072/psu.geol.16.4.340

**Введение**

Несмотря на длительный период изучения карстовых озер, интерес к этим уникальным природным объектам не ослабевает. Сегодня не только выявляются морфологические и генетические особенности озерных котловин (Ахмедова, 2010, 2011), но и оценивается их рекреационный потенциал, а также ресурсный потенциал с точки зрения питьевого водоснабжения, озера изучаются как замкнутые экосистемы (Ткаченко, Таразанов, 2009; Копылова, 2014). Современные крупные обобщения в области морфометрии озер в целом и карстовых озер в частности проводятся с использованием базы данных WORLDLAKE, созданной С.В. Рянжиным (Рянжин, Ульянова, 2000).

Согласно карстологическому районированию, территория, в пределах которой расположены исследованные авторами данной работы озера, а именно террито-

рия с. Усть-Кишерть, входит в Кишертский (Кишертско-Суксунский) карстовый район (Горбунова и др., 1992). Кафедра динамической геологии и гидрогеологии Пермского государственного университета изучает карстовые явления и формы, в том числе и карстовые озера, на территории с. Усть-Кишерть более 65 лет. Системные исследования карста и геоморфологии на этой территории экспедициями кафедры начались с 1946 г. Особый интерес к изучению карстовых озер был вызван образованием в 1949 г. трех провалов практически в центре села. Возникшие впадины заполнились водой и превратились в озера, получившие местные названия Провал и Восьмерка.

Одно из наиболее представительных обобщений по генезису, морфологии и гидрохимии карстовых озер Пермской области (Пермского края) представлено в специальной главе «Озера карстовых районов» в монографии «Основы карстоведе-

ния» (Максимович, 1969). Основываясь на результатах гидрохимического опробования вод 219 карстовых озер, выполненных К.А. Горбуновой, К.Г. Бутыриной и Р.В. Яценко в 1963–1965 гг. (Горбунова и др., 1967), Г.А. Максимович сформулировал ряд важных закономерностей, характеризующих особенности гидрохимии карстовых озер, в том числе и озер Кишертско-Суксунского района преимущественно гипсового и карбонатно-гипсового карста:

- сопоставление химического состава атмосферных осадков, вод поверхностного стока, вод покровных, коренных карстующихся и некарстующихся отложений дает возможность определения преобладающего источника питания;
- для вод карстовых озер характерны сезонные изменения химического состава, которые могут сопровождаться сменой гидрохимических фаций;
- химический состав вод карстовых озер неоднороден по акватории озера и по глубине, что определяется условиями питания, водообмена и биохимическими процессами;
- химический состав вод карстовых озер изменяется по мере развития озерной котловины.

На начальных этапах исследований и до сегодняшних дней для характеристики химического состава подземных вод использовалась химическая классификация Г.А. Максимовича, в которой основным таксоном является гидрохимическая фация. Гидрохимическая фация – это участок наземной и подземной гидросферы, характеризующийся на всей площади одинаковыми гидрохимическими условиями и свойствами, определяемыми по преобладанию каких-либо растворенных веществ. Выделяются фации по первым трем (иногда четырём и более) преобладающим по массе компонентам, причём название гидрохимической фации даётся в порядке убывания их значений. Гидрохимические фации по первому (преобладающему) иону объединяются в гидрохимические формации. Название ей даётся в

порядке убывания содержания ионов, мг/дм<sup>3</sup> (Максимович, 1969).

Одно из последних опробований вод карстовых озер с целью выявления изменений в их химическом составе было проведено в полевой период 2014 г. Химический анализ отобранных водных проб был выполнен на современном оборудовании в аккредитованной лаборатории гидрохимического анализа кафедры динамической геологии и гидрогеологии университета. Схема отбора проб представлена на рис. 1.

### Гидрогеологические и карстологические условия территории исследования

Кишертский карстовый район в геолого-структурном отношении соответствует узкой контактной зоне карбонатов Уфимского вала (восточная окраина Восточно-Европейской платформы) и терригенных пород западной окраины Предуралья с прослоями и линзами известняка, гипса, каменной соли лекской, поповской, кошелевской свит филипповского и иренского горизонтов кунгурского яруса приуральского отдела пермской системы. Участками в разрезе присутствуют обвальное-карстовые сцементированные отложения, мощность которых достигает 45 м.

Основной гидрогеологической особенностью района является то, что здесь происходит разгрузка подземных вод, формирующихся в пределах Уфимского вала (в геоморфологическом отношении выделяется как Уфимское плато). Воды локализованы вдоль трещинных и закарстованных зон, литологических контактов. Пресные гидрокарбонатно-кальциевые воды зоны горизонтальной циркуляции вала разгружаются в аллювий, брекчию или выветрелые гипсы, где преобразуются в сульфатно-кальциевые с минерализацией до 3 г/дм<sup>3</sup>. Замещение с запада на восток карбонатно-сульфатных пород вала терригенными породами прогиба создает условия для напорной разгрузки пресных гидрокарбонатных вод с высокой сульфатной емкостью, сопровождающейся

смешиванием с сульфатными водами, перемещающимися вдоль уступа плато. Здесь, в частности в районе с. Усть-Кишерть, на относительно небольшой площади наблюдаются все возможные виды разгрузки карстовых вод, которые фиксируются по изменению состава и минерализации водопроявлений: наземная или родниковая разгрузка; субаквальная или подводная разгрузка карстовых вод в руслах рек и на дне озер; подземная или скрытая разгрузка карстовых вод в контактирующие с гипсами и ангидритами воды других водоносных горизонтов (Горбунова, Максимович Н., 1981).

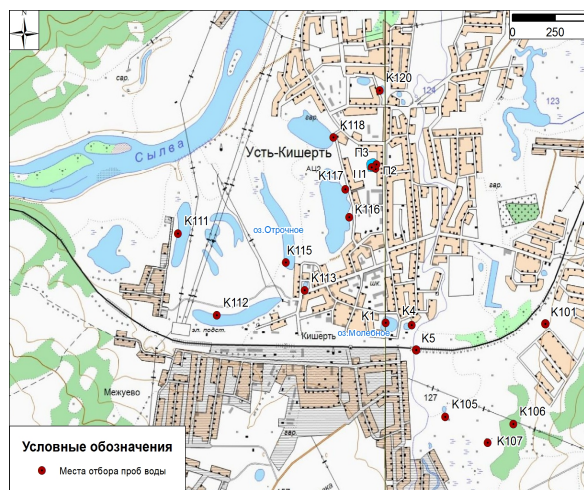


Рис. 1. Схема отбора водных проб

В районе преобладают покрытый (под-аллювиальный) и перекрытый типы карста, характеризующиеся крупными провалами, воронками, котловинами, депрессиями, карстовыми реками, озерами. Карстовые полости, целиком заполненные глиной и щебнем, частично заполненные и незаполненные, вскрываются при бурении и их вертикальные размеры достигают 15 м и более. Образование провалов больших размеров (свыше 20 м в поперечнике) нередко вызвано наличием гидродинамической зоны сифонной циркуляции с пресными, весьма агрессивными к сульфатным породам карстовыми водами, поступающими с Уфимского плато в массив, содержащий гипс-ангидритовые пласты. Среди поверхностных форм карста широко развиты воронки, блюдцеобраз-

ные понижения, карстовые озера, котловинами которых являются карстовые воронки различного генезиса.

Размеры озерных котловин в карстовых воронках в плане изменяются в широком диапазоне – от 5 до 120 м. Установленная глубина озер – от 0,6 до 18 м. Морфометрические особенности озерных котловин представлены в табл. 1.

Река Сылта – основная дрена исследуемой территории по морфолого-гидрологической типизации – относится к транзитному типу преимущественно с дождевым питанием. Доля подземного питания может составлять 15% (Максимович, 1969). При пересечении участков и районов развития различных литологических типов карста (сульфатного, сульфатно-карбонатного, карбонатного) воды реки на коротких отрезках русла часто меняют свой фациальный облик с  $\text{HCO}_3^-$ — $\text{SO}_4$ — $\text{Ca}$  на  $\text{SO}_4$ — $\text{HCO}_3^-$ — $\text{Ca}$  и обратно. Минерализация вод при фациальных изменениях практически остается постоянной в пределах  $548 \pm 20$  мг/дм<sup>3</sup>. Содержание основных компонентов, таких как  $\text{HCO}_3^-$ , колеблется в пределах средних значений –  $177 \pm 20$  мг/дм<sup>3</sup>,  $\text{SO}_4^{2-}$  –  $174 \pm 10$  мг/дм<sup>3</sup>,  $\text{Ca}^{2+}$  –  $100 \pm 5$  мг/дм<sup>3</sup>, содержание  $\text{Mg}^{2+}$  стабильно в пределах 19 мг/дм<sup>3</sup>, содержание  $\text{Na}^+$  – 21 мг/дм<sup>3</sup>, а  $\text{Cl}^-$  – 30 мг/дм<sup>3</sup>. Из микрокомпонентов в составе вод р.Сылва следует отметить относительно повышенное содержание Fe, изменяющееся на различных участках русла от 0,04 до 0,82 мг/дм<sup>3</sup>. В среднем содержание Fe соответствует 0,37 мг/дм<sup>3</sup>. Воды в р.Сылва в отличие от вод покровов и коренных отложений являются слабощелочными и характеризуются значениями pH от 8,2 до 8,4, в среднем 8,3.

Приведенные данные о гидрохимическом облике вод р.Сылва свидетельствуют о сбалансированности по содержанию основных компонентов –  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и стабильности содержания  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  в условиях транзита руслового потока через участки, сложенные карстующимися карбонатными и сульфатными горными породами.

Таблица 1. Морфометрические особенности озерных котловин

Озеро (номер пробы)	Морфометрические харак- теристики, м			Примечание
	длина	ши- рина	глуби- на	
К-1 (К 106)	15,0	12,5	0,6	Озеро в карстовом блюдцеобразном понижении. Расположено на I террасе в долине р. Кишертки. Берега заболочены
К-3 (К 107)	24,8	22,5	3,5	Озеро в карстовой воронке. В 200 м к юго-западу от озера К-1. Берега заболочены
К-5 (К 105)	21,4	18,5	6,2	Озеро в карстовой воронке. Расположено в 100 м к северо-западу от оз. К-3 в 60 м от русла р. Кишертки. Берега высотой 2 м, задернованы. Поверхность воды покрыта ряской
Молеб- ное (К 1)	108,0	120,0	19,5	Озеро в карстовой провальной воронке. Расположено на II террасе р. Сылвы. Самое крупное озеро района
Безы- мянное (К 4)	46,0	46,0	4,7	Озеро в карстовой провальной воронке. Расположено в 20 м к востоку от озера Молебное. Южный берег озера крутой – 4,5-5 м, северный более пологий высотой 6 м
Провал (П 1, П 2, П 3)	69,0	54,4	3,5	Озеро на момент образования в карстовой провальной воронке имело размеры в плане 50,5x40 м и глубину 9 м. Высота современных склонов 5,1-6,4 м
Яма (К 113)	27,0	27,0	2,5	Озеро в карстовой воронке. Расположено на восточной окраине с. Усть-Кишерт на II террасе р. Сылвы. Высота северного склона 4-4,5 м, южного 3 м. Поверхность воды покрыта ряской
Среднее Березен- ское (К 120)	20,0	20,0	1,0	Озеро в карстовом блюдцеобразном понижении. Площадь озера – 800 м <sup>2</sup>
Оброч- ное (К 115)	510,0	70,0	1,2	Озеро-старица. Расположено в 350 м восточнее р. Сылва. Восточный и западный берега высотой 2-2,5 м, северный и южный – низменные, заболоченные. Площадь озера – 33 тыс. м <sup>2</sup>
Кислое (К 116, К 117)	540,0	250,0	2,0	Озеро-старица. Расположено западнее с. Усть-Кишерт у крутого уступа II надпойменной террасы. Высота уступа над озером достигает 5-8 м. Северный, западный и южный берега низменные, заболоченные. Его площадь составляет 87,3 тыс. м <sup>2</sup>
Мишут- кино (К 118)	130,0	140,0	1,0	Озеро-старица в 150 м севернее оз. Кислое. Имеет овальную форму. Площадь озера – 24,0 тыс. м <sup>2</sup>
Сысково (К 112)	474,0	75,0	1,0	Озеро-старица имеет овальную форму. Площадь озера – 32,3 тыс. м <sup>2</sup>
Межуев- ское (К 111)	330,0	65,0	1,0	Озеро-старица. Площадь озера – 22,7 тыс. м <sup>2</sup>

Относительный баланс и стабильность содержания основных компонентов позволяют использовать гидрохимический облик речных вод в качестве «эталоны» для определения преобладающего источника питания (атмосферного, поверхностного, подземного) иных водопоявлений района – озер, карстовых рек, родников.

На территории Кишертского карстового района широкое распространение получили озера-старицы. К концу лета уровень озер сильно понижается, некоторые из них могут совсем исчезнуть в результате испарения и просачивания воды через днища озерных котловин. Во время высоких половодий старичные озера соединяются с р. Сылва, образуя озеровидные расширения. Питание старичных озер происходит за счет поверхностных вод, грунтовых вод, а также атмосферных осадков. Некоторые озера-старицы подпитываются и за счет подземных вод коренных карстующихся отложений, в результате чего воды таких озер имеют повышенную минерализацию и повышенное содержание сульфатов. Наиболее интересным из них является оз. Кислое площадью 87 тыс. м<sup>2</sup> и глубиной 2,0–2,1 м. Минерализация озерной воды изменяется от 1,5–1,8 г/дм<sup>3</sup> летом до 2,1 г/дм<sup>3</sup> зимой, состав преимущественно сульфатно-кальциевый. Дно озера сложено сероводородным илом (Горбунова, Максимович Н., 1981).

Тот факт, что некоторые озера-старицы имели постоянное питание за счет восходящих трещинно-карстовых вод, подтверждается ранними наблюдениями, например, из оз. Оброчное, по свидетельствам местных жителей в 1948 г., вытекала река, которая в настоящее время отсутствует. В этот же период (1948–1949 гг.) из оз. Кислое вытекал ручей, впадавший в оз. Оброчное. В русле ручья, вытекающего из оз. Кислое и впадающего в оз. Оброчное, в воронкообразном углублении существовал восходящий карстовый источник. После провала в 1949 г. воронка превратилась в поглощающую, а вода в ручье исчезла. Озеро Кислое и в наши дни

соединяется с оз. Оброчное, но не протокой с хорошо выраженным руслом, а заболоченным участком. То, что одним из источников питания оз. Кислое и в настоящее время остаются подземные воды, подтверждается наличием в юго-восточной части озера в зимний период незамерзающих участков водной поверхности.

Необходимо отметить, что Пермский край расположен в широтной зоне преобладания  $\text{HCO}_3^-$  – Ca гидрохимической фации озер лесного пояса Северного полушария и в данном контексте опробованные озера Кишертско-Суксунского района не являются исключением, имея на начальный период опробования (конец 50 – начало 60-х гг. XX в.) преимущественно  $\text{HCO}_3^-$  – Ca и реже  $\text{HCO}_3^-$  – Na состав и минерализацию до 1 г/дм<sup>3</sup>. Учитывая выводы, сделанные в свое время К.А. Горбуновой (Горбунова, 1963) о том, что составляющие водного питания озер (атмосферные осадки, поверхностные и подземные воды) определяют их химический состав, и то, что карстовые озера с подземным питанием в районах сульфатного карста характеризуются увеличением минерализации и содержания сульфатов с глубиной, представим краткую характеристику основных составляющих подземного водного питания карстовых озер.

#### **Характеристика вод покровных отложений**

В пределах исследуемой территории с. Усть-Кишерт безнапорные воды четвертичных покровных отложений включают почвенные и болотные воды, верховодку и грунтовые воды аллювиального комплекса. Аллювиальный комплекс имеет наибольшее площадное распространение в пойме р. Сылва, на I, II и частично III надпойменных террасах. Мощность комплекса колеблется от 4,0 до 12,0 м, редко уменьшаясь до 1,5–3,0 м или увеличиваясь на отдельных участках до 14,5–23,2 м.

Водовмещающими породами комплекса являются суглинки, суглинки с гравием

или галькой, глины с гравием и галькой, супеси, гравийные и галечниковые грунты. Учитывая, что исследуемая территория приурочена к зоне достаточного увлажнения с общей суммой осадков 475–500 мм/год, инфильтрация значительно превышает склоновый сток, а около 100 мм осадков идет на формирование ресурсов подземных вод, теоретически химический состав вод покровных отложений должен соответствовать  $\text{HCO}_3^-$ –Ca составу дождевых вод, вместе с тем состав этих вод более изменчив.

Воды аллювиального комплекса вскрывались многочисленными колодцами. Данные по 115 колодцам, опробованным в один период года в конце июня – начале июля 1958, 1978, 1979 и 1993 гг. (позднее практически все колодцы за редким исключением были засыпаны или обвалились и не используются в настоящее время), дают представление о составе вод данного комплекса (табл. 2).

Следует отметить, что воды аллювиального комплекса гидродинамически связаны как с водами коренных отложений кунгурского яруса, так и с водами поверхностного локализованного стока – водами р. Сылва и ее притоков. Помимо атмосферных осадков существенное влияние на химический состав вод аллювия оказывают воды р. Сылва, особенно в периоды половодья, когда затапливаются поймы и низкие террасы.

Наш анализ гидрохимических данных с 1958 по 1993 г. свидетельствует о том, что на территории района присутствуют две фоновые фации, условно разделенные долиной р. Кишертки:  $\text{HCO}_3^-$ – $\text{SO}_4$ –Ca в восточной части территории и  $\text{HCO}_3^-$ –Ca– $\text{SO}_4$  в западной. Западная часть территории – междуречье Сылвы и Кишертки – характеризуется хорошо развитым пойменно-террасовым комплексом отложений, состав вод которых формируется преимущественно за счет атмосферных осадков и вод р. Сылва.

Установленным фактом является то, что в восточной части территории на фоне развития  $\text{HCO}_3^-$ – $\text{SO}_4$ –Ca фации выделяют-

ся отдельные небольшие участки, в основном в непосредственной близости от карстовых озер, характеризующиеся  $\text{SO}_4$ – $\text{HCO}_3^-$ –Ca (Na) и  $\text{SO}_4$ –Ca– $\text{HCO}_3^-$  составом вод, что может свидетельствовать о локальном подпитывании вод покровов трещинными водами карстующихся гипсангидритов в результате отсутствия выдержанных водоупоров, что было отмечено в более ранних исследованиях (Горбунова, 1965).

**Таблица 2.** Среднегодовой химический состав, минерализация, pH вод аллювиального комплекса в летнюю межень за период с 1958 по 1993 гг. (по данным опробования колодцев в с. Усть-Кишерть)

Анионы, катионы	Среднее, мг/дм <sup>3</sup>	Min-max, мг/дм <sup>3</sup>
$\text{HCO}_3^-$	446,29	218,12-737,31
$\text{SO}_4^{2-}$	216,92	60,16-592,01
Cl	69,24	15,95-206,18
$\text{Ca}^{2+}$	207,44	85,93-364,31
$\text{Mg}^{2+}$	35,67	12,76-88,84
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	32,0	4,33-82,95
$\text{NO}_3^-$	66,77	4,99-253,22
$\text{NO}_2^-$	0,29	0,03-1,60
$\text{NH}_4^+$	0,27	0,07-0,97
Минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	1001,13	583,57-1761,10
pH	7,27	6,79-7,96

### Характеристика вод коренных пород

Подземные воды коренных пород в районе с. Усть-Кишерть приурочены к различным литолого-фациальным комплексам: карбонатно-глинистым и карбонатно-сульфатным отложениям кунгурского яруса приуральского отдела пермской системы, где трещинно-каверновые воды циркулируют по трещинам, каналам, кавернам и полостям. С позиции гидродинамической зональности анализируемый участок является сложным гидрогеологическим массивом, где развиты основные зоны гидродинамического профиля: горизонтальной, сифонной, поддолинной и глубинной циркуляции. На участках зон трещиноватости и зон разломов поднимаются высокоминерализованные воды

глубоких водоносных комплексов (Шимановский, Шимановская, 1973).

Фациальный состав вод коренных отложений очень пестрый, но преобладающей, распространенной по всей изучаемой территории является  $\text{SO}_4\text{-Ca-HCO}_3$  фация. Широкое распространение имеет  $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$  фация. Остальные фации локального распространения.

**Таблица 3.** Среднегодовой химический состав, минерализация, pH вод иренского водоносного горизонта (по данным опробования скважин в с. Усть-Кишерть)

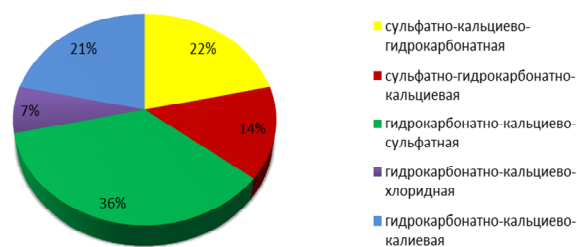
Анионы, катионы	Среднее, мг/дм <sup>3</sup>	Min-max, мг/дм <sup>3</sup>
$\text{HCO}_3^-$	425,56	161,69-1728,81
$\text{SO}_4^{2-}$	1229,27	253,07-2277,04
Cl <sup>-</sup>	237,64	28,36-265,8
$\text{Ca}^{2+}$	459,86	157,31-796,59
$\text{Mg}^{2+}$	91,83	30,40-212,80
$\text{Na}^+\text{+K}^+$	102,86	11,96-634,90
Минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	2494,93	821,48-5910,74
pH	7,27	6,58-7,61

Минерализация вод иренского водоносного горизонта изменяется от 0,8 до 5,9 г/дм<sup>3</sup>. Минимальные значения минерализации отмечены на небольших локальных участках на юго-западе и юге территории. Максимальные значения проявляются локально в пределах центральной части территории. На большей же части исследуемой территории подземные воды иренского водоносного горизонта имеют минерализацию около 2 г/дм<sup>3</sup>. В табл. 3 приведены данные по опробованию вод иренского водоносного горизонта из скважин, которые дают возможность сравнить состав вод этих отложений с составом вод покровов, поверхностных водотоков и озер.

### Химический состав озерных вод

По результатам опробования озерных вод в 2014 г. их химический состав соответствовал пяти гидрохимическим фациям, при этом гидрокарбонатно-кальцево-

сульфатная фация вод является преобладающей (рис. 2, табл. 4). Одной из причин изменения фациального состава вод озёр во времени может являться процесс развития озерных котловин – осыпание склонов и кольматация поноров и иных водоподводящих каналов, существовавших в донной части на момент образования провалов.



**Рис. 2.** Фациальный состав озер с. Усть-Кишерть по данным 2014г.

Другие причины связаны с уменьшением объема подземного стока, в данном случае с Уфимского плато, снижением уровней подземных вод и с изменением гидродинамического режима, вызванным сменой на отдельных участках восходящего режима родников на нисходящий.

Последнее предположение отчасти подтверждается исчезновением перетоков между старичными озерами Кислое и Оброчное, исчезновением восходящих родников или уменьшением их дебитов. Например, дебит Зуевского родника в 80-х, начале 90-х гг. прошлого века фиксировался на уровне 12 дм<sup>3</sup>/с, а в настоящее время снизился до 3 дм<sup>3</sup>/с.

Естественно, что в результате совместного действия геологических и гидрогеологических факторов неизбежны процессы, отчасти меняющие и структуру питания озер, что неизбежно отражается на химическом составе озерных вод (табл. 4).

В районах развития преимущественно сульфатного и карбонатно-сульфатного карста абсолютное большинство карстовых озер по характеру питания подразделяется на три типа: *озера-воронки поверхностного питания, озера-воронки со смешанным питанием, озера родниковых котловин* (Катаев, 2000).

Таблица 4. Фациальный состав вод озер

Озеро	Гидрохимическая фация (по Г.А. Максимовичу)					
	1958 (Максимович, 1969; Горбунова, 1979)	1978 (Горбунова, 1979)	1979 (фонды кафедры)	1993 (фонды кафедры)	2007 (фонды кафедры)	2014 (фонды кафедры)
Мишуткино	-	-	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	-	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Кислое	-	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Молебное	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na+K-Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na+K-Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -K <sup>+</sup>
Оброчное	-	-	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Сысково	-	-	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Na+K	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -Na+K	-	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Провал (приповерхностная часть)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na+K-Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -Cl <sup>-</sup>
Провал (придонная часть)	-	-	-	-	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Межуевское	-	-	-	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	-	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Среднее Березенское	-	-	-	-	-	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -K <sup>+</sup>
Яма	-	-	-	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -K <sup>+</sup>
Безымянное	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	-	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (1980г)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -Mg <sup>2+</sup>	-	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
К-1	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	-	-	-	-	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>
К-5	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	-	-	-	-	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup>
К-3	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -Ca <sup>2+</sup>	-	-	-	-	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>

Озера-воронки поверхностного питания формируются в карстовых, карстово-суффозионных воронках различных морфологических типов: блюдце-, чаше-, конусовидные. В периоды глубокой межени и в маловодные годы вода из озер данного типа частично испаряется, а частично инфильтруется в грунт. Озера, как правило, большую часть года являются бессточными и не имеют поверхностных притоков.

Их питание осуществлялось за счет атмосферных вод.

Однако в паводковые периоды, когда формируется основной водный объем, воды озера могут подпитываться поверхностным стоком, тем самым меняя тип с «бессточного» на «приточно-сточный». Основной водный объем озера формируют именно в паводковый период.



Озера данного типа являются пополнителями запасов подземных вод и в гидродинамическом отношении приурочены к зоне приповерхностной циркуляции вод. Днища этих озер являются подвешенными по отношению к уровню карстовых вод. В соответствии с известной генетической классификацией карстовых и тектонокарстовых озер этот тип относится к озерам области поглощения (Максимович, 1969).

Как правило, воды данного типа озер характеризуются относительно низким содержанием  $\text{HCO}_3^-$  (50–180 мг/дм<sup>3</sup>),  $\text{SO}_4^{2-}$  (1–160 мг/дм<sup>3</sup>), Са (25–70 мг/дм<sup>3</sup>) и низкой минерализацией (150–350 мг/дм<sup>3</sup>).

Озера-воронки со смешанным питанием являются типичными гидрогеологическими окнами – нижняя часть озерных котловин развита ниже уровня грунтовых вод. Озера данного типа генетически относятся к озерам подземного стока (Максимович, 1969). Происхождение котловин коррозионно-провальное. Озера принадлежат к гидродинамической зоне горизонтальной ненапорной или напорной циркуляции. Основное питание озер подземное, дополнительное питание озера могут получать от временного поверхностного стока в паводковый период, незначительное питание приходится на атмосферные осадки и конденсат. Озера, как правило, бессточные с поверхности. Подземное питание и одновременный подземный сток осуществляются через поноры на дне котловины. Озера постоянные, их существование не зависит от водности сезона.

По составу воды данного типа озер характеризуются относительно высокой минерализацией, часто более 500 мг/дм<sup>3</sup> (диапазон 350–1100 мг/дм<sup>3</sup>), значения водородного показателя варьируют в пределах 6,8–7,5. В том случае, если доминирует питание от коренных карстующихся сульфатных отложений, в озерных водах фиксируется повышенное содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  в диапазоне 300–700 мг/дм<sup>3</sup> при содержании  $\text{HCO}_3^-$  от 50 до 150 мг/дм<sup>3</sup>. Относительно повышенное содержание в водах  $\text{HCO}_3^-$  в диапазоне 250–600 мг/дм<sup>3</sup>

при содержании  $\text{SO}_4^{2-}$  от 1,0 до 150 мг/дм<sup>3</sup> свидетельствует о доминирующем питании вод озера от вод покровных отложений, в данном случае – вод аллювиального комплекса. Сравнительно одинаковое содержание в водах  $\text{HCO}_3^-$  (290–300 мг/дм<sup>3</sup>) и  $\text{SO}_4^{2-}$  (310–320 мг/дм<sup>3</sup>) свидетельствует о равнозначном влиянии вод покровов и вод коренных отложений на химический состав вод озера.

Озера родниковых котловин связаны с коррозионно-эрозионной проработкой карстующихся и перекрывающих отложений. Котловины озер могут быть дополнительно осложнены провальными явлениями. Подобные озера характерны для участков разгрузки карстовых вод зон вертикальной нисходящей и сифонной циркуляции. Озера имеют поверхностный сток, дебит которого меняется не только в зависимости от водности сезона, но и в течение суток. Особенно заметны колебания объемов стока в зависимости от конденсата в меженный период, когда расходы озерного стока минимальны. Воды данной группы озер максимально минерализованы (от 2000 до 3500 мг/дм<sup>3</sup>), с высоким содержанием  $\text{SO}_4^{2-}$  (1100–1500 мг/дм<sup>3</sup>) и Са (400–600 мг/дм<sup>3</sup>). Содержание  $\text{HCO}_3^-$  достигает 300–400 мг/дм<sup>3</sup>. Значения водородного показателя изменяются в широких пределах от 6,6 до 8,1, но характерно рН 7,1–7,3.

Среди исследованных озер по доминирующему источнику питания выделяются несколько групп (табл. 5).

Среди многообразия исследованных карстовых озер в контактной зоне карбонатов Уфимского вала платформы и терригенных пород западной окраины Предуралья выделяются озера Молебное и Провал, имеющие провальное происхождение и расположенные над локальными понижениями кровли карстующихся пород иренского горизонта. Рельеф кровли иренского горизонта в районе с. Усть-Кишерть представляет собой полузамкнутую депрессию, открытую на северо-запад (рис. 3).

Таблица 5. Основные гидрохимические показатели озерных вод

Озеро	Основные анионы, катионы, мг/дм <sup>3</sup>				Минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	рН	Fe <sub>общ</sub>
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	СГ			
1. Озера-старицы							
1а. Озера-старицы с доминирующим питанием водами поверхностного стока и атмосферными осадками							
Сысово	125	15	30	8	196	7,72	0,14
Межуевское	189	9	51	4,3	268	7,75	2,10
1б. Озера-старицы с доминирующим локализованным субаквальным питанием водами коренных карстующихся отложений							
Кислое	61	673	230	17	1044	6,88	0,17
Мишуткино	46	375	132	17	612	7,44	0,17
Оброчное	117	523	209	18	920	6,99	0,15
2. Карстовые озера-воронки							
2а. Карстовые озера-воронки поверхностного питания водами атмосферных осадков и поверхностного стока							
Среднее Березинское	171	2,0	43	1,6	236	6,74	0,09
К-5	67	166	65	0,8	336	8,94	0,16
2б. Карстовые озера-воронки смешанного питания							
2б-1. Карстовые озера-воронки с доминирующим питанием водами покровных отложений							
Безымянное	332	70	95	26	579	7,93	-
Яма	235	1,1	61	4,3	322	7,18	0,64
К-3	284	76	107	0,9	490	7,83	0,04
2б-2. Карстовые озера-воронки, смешанного, преимущественно подземного питания водами покровных и коренных отложений							
Молебное (приповерхностная часть до глубины 3,0м)	116	1,2	25	6	166	8,75	0,02
Молебное (придонная часть на глубине 17,5 м)	363	1,3	57	8	450	6,55	18,10
Провал (приповерхностная часть до глубины 1,5 м)	215	13	57	17	294	7,75	1,4
Провал (придонная часть на глубине 4,0 м)	573	157	178	25	997	7,00	0,6
К-1	290	314	190	3,2	838	7,51	0,10

Предположительно депрессия имеет эрозионно-карстовое происхождение. Она ограничена изогипсой с абсолютной отметкой 110 м. Дно депрессии осложнено мульдообразными понижениями и куполовидными возвышенностями.

По глубине мульды делятся на два типа – относительно глубокие и относительно

мелкие. Дно глубоких мульд опущено относительно бровки депрессии на 70–80 м и зафиксировано на абсолютных отметках 10–20 м. Глубина мелких мульд относительно бровки депрессии достигает 40–50 м. Дно мелких мульд фиксируется на абсолютных отметках 50–70 м. Не лишено смысла предположение, что мульды

сформировались как результат локальных вертикальных напорных перетоков вод карбонатной толщи артинского и филипповского горизонтов в вышележащие отложения иренского горизонта.

В подземном рельефе кровли иренского горизонта выделяются и относительно узкие седловины, соединяющие глубокие и мелкие мульды. Борта седловин ограничены изогипсами с абсолютными отметками 80 м. Котловина оз. Провал расположена над глубокой мульдой с абсолютной отметкой дна 20 м, а котловина оз. Молебное расположена над седловиной с отметками 70–80 м. Теоретически различное расположение котловин должно было отразиться и на структуре питания вод этих озер и, как следствие, на их химическом составе относительно глубины. В озерах данного подтипа выявляется стратификация состава и минерализации вод с глубиной. В приповерхностной части озер (глубины 1,5–3,0 м) воды по составу соответствуют химизму смешанных вод атмосферных осадков и поверхностного стока, а в придонной части составу вод покровных отложений, в которых собственно и сформированы котловины этих озер.

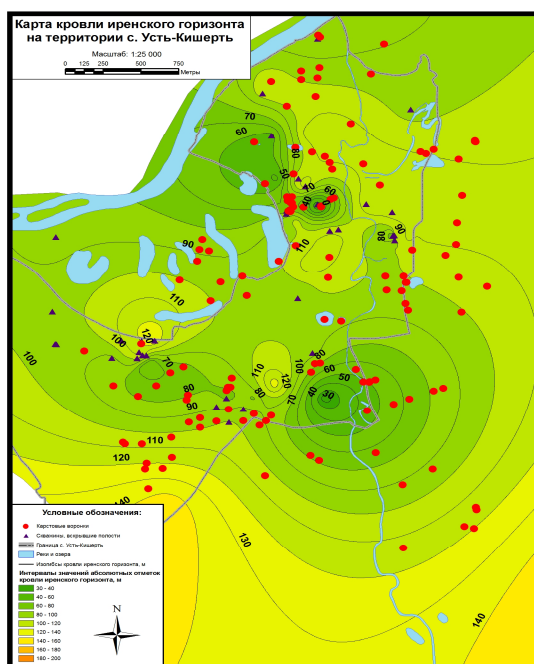


Рис. 3. Карта кровли иренского горизонта на территории с. Усть-Кишерть (Ковалева, Катаев, 2014)

Первые сводные данные об изменениях минерализации вод озер с глубиной были представлены в работе (Горбунова и др., 1967).

Увеличение минерализации с глубиной и повышение содержания сульфат-иона объяснялись подтоком грунтовых вод из бортов в одних случаях и подтоком карстовых вод в придонной части озерной котловины в других. Было отмечено, что в некоторых озерах сульфаты в придонной части восстанавливаются до сероводорода. Факт стратификации озерных вод был подтвержден результатами полевых исследований кафедры динамической геологии и гидрогеологии в 2014 г.

Пробы воды в оз. Молебное отбирались через каждые 3 м, начиная с поверхности до дна (17,5 м). Выявлено, что минерализация воды в оз. Молебное увеличивается от 160 до 450 мг/дм<sup>3</sup> в зависимости от глубины, при этом гидрохимическая фация оставалась неизменной –  $\text{HCO}_3^- \text{--Ca}^{2+}$ . Однако было установлено увеличение с глубиной содержания ионов аммония, железа и сероводорода. Значение водородного показателя с глубиной уменьшалось от 8,75 до 6,55.

Минерализация воды в оз. Провал увеличивается с глубиной от 294 до 997 мг/дм<sup>3</sup>. На дне его химический состав воды резко отличается от химического состава воды в приповерхностной части – увеличивается содержание сероводорода, гидрокарбонат-, сульфат-, хлорид-ионов, ионов кальция, магния, натрия и аммония. Таким образом, наблюдается изменение гидрохимической фации с увеличением глубины с  $\text{HCO}_3^- \text{--Ca}^{2+} \text{--Cl}^-$  на  $\text{HCO}_3^- \text{--Ca}^{2+} \text{--SO}_4^{2-}$ . Изменение фации связано с разгрузкой подземных вод в придонной части котловины озера. Значение водородного показателя уменьшается от 7,75 до 7,00.

### 3. Карстовые озера родниковых котловин

Озеро данного типа, вероятно, существовало в воронке на месте современного

выхода родника под названием «Зуевский», который находится на северо-западной окраине п. Усть-Кишерть. В 1991 г. родник получил статус ООПТ местного значения. Родник восходящий в ассиметричной конусообразной карстовой воронке с западным бортом, размытым руслом родникового стока. Воды родника, по результатам обследования в июне 2017 г., имели минерализацию 2110 мг/дм<sup>3</sup>, характеризовались содержанием SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 1177,3 мг/дм<sup>3</sup>, Ca – 436,5 мг/дм<sup>3</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> – 380,6 мг/дм<sup>3</sup>, рН – 7,08.

### Основные выводы

Анализ макрокомпонентного состава вод озер свидетельствует об их относительной формационной стабильности во времени. Вместе с тем периодически изменяется фациальный облик озерных вод, что связано с флуктуацией содержания основных компонентов, таких как HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, особенно в озерах-воронках смешанного питания водами аллювиального комплекса и водами коренных отложений. Основными причинами изменения фациального состава вод озёр во времени являются локальные процессы деформационных изменений склонов озерных котловин и, как результат, кольматация понов и иных водоподводящих каналов, существовавших в донной части на момент образования провалов. В региональном плане изменения фациального состава вод озёр во времени могут быть связаны с изменением гидрогеологической ситуации в районе, а именно с периодически изменяющимися объемами подземного стока с Уфимского плато, вследствие которых меняется положение уровня подземных вод.

Результаты исследований позволили детализировать гидрохимическую стратификацию вод в озерных котловинах провального генезиса. Выявлено, что в озерах Молебном и Провал с глубиной увеличивается не только содержание основных компонентов, но и содержание

ионов аммония, железа и сероводорода. С глубиной изменяется и значение водородного показателя – водная среда становится более кислой. Ранее эти факты не были выявлены.

Результаты исследований позволили уточнить характер питания озерных вод и выделить в группах «озера-старицы» и «карстовые озера-воронки» подгруппы озер по доминирующему питанию водами атмосферных осадков, поверхностного стока, водами покровных и коренных отложений.

Установлено, что характер питания озер-воронков провального происхождения связан с местоположением озерной котловины относительно элементов погребенного рельефа кровли иренского горизонта – озера, котловины которых были сформированы над глубокими мульдами с абсолютными отметками дна 10–30 м, будут иметь доминирующее питание водами коренных карстующихся отложений.

*Работа выполнена по гранту РФФИ-р № 17-45-590369.*

### Библиографический список

- Ахмедова Н.С.* Классификация котловин карстовых озер мира по особенностям морфологического строения на основе кластерного анализа // Общество. Среда. Развитие. 2011. № 1. С. 228-232.
- Ахмедова Н.С.* Особенности морфометрического строения различных типов карстовых озер // География: проблемы науки и образования. LXIII Герценовские чтения: матер. ежегодной Всерос. науч.-метод. конф. (Санкт-Петербург, 22-24 апреля 2010 г.). СПб.: Полиграф-Ресурс, 2010. С. 360-362.
- Горбунова К.А.* Влияние условий питания и стадий развития на химический состав карстовых озер // Химическая география и гидрогеохимия. Пермь, 1963. Вып. 2(3). С. 73-80.
- Горбунова К.А.* Особенности гипсового карста: путеводитель по Кишертско-Суксунскому карстовому району. Пермь, 1965. 119 с.
- Горбунова К.А., Бутырина К.Г., Яценко Р.В.* Карстовые озера // Химическая география

- вод и гидрогеохимия Пермской области. Пермь, 1967. Вып. 4(5). С.64-72.
- Горбунова К.А. Морфология и гидрогеология гипсового карста. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1979, 93с.
- Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Типы разгрузки карстовых вод в районах гипсоангидритового карста // Европейская региональная конференция по спелеологии: сб. от материалы-София. 1981. С.439-441.
- Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г. Карст и пещеры Пермской области. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1992. 200 с.
- Катаев В.Н. Гидрогеологические условия Красноясыльского полигона: типы вод, водопоявления и их химизм // Гидрогеология и карстоведение: межвуз. сб. науч. тр. / Перм. ун-т. Пермь, 2000. Вып. 13. С. 127-136.
- Ковалёва Т.Г., Катаев В.Н. Подземный рельеф карстующихся пород как индикатор пространственного распределения форм карста // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. URL: [www.science-education.ru/118-14415](http://www.science-education.ru/118-14415) (дата обращения: 26.08.2014).
- Копылова Н.С. Статистические оценки основных морфометрических параметров карстовых озёр мира // Общество. Среда. Развитие. 2014. № 4. С. 169-172.
- Максимович Г.А. Основы карстоведения. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1963, Т.1., 444 с.
- Максимович Г.А. Основы карстоведения. Т.2: Вопросы гидрогеологии карста, реки и озера карстовых районов, карст мела, гидротермокарст: учеб. пособие / Геогр. о-во СССР; Ин-т карстоведения и спелеологии; Перм. ун-т. Пермь, 1969. 529 с.
- Рянжин С.В., Ульянова Т.Ю. Географическая информационная система «Озера мира» – GIS WORLDLAKE // Докл. АН СССР. 2000. Т.370, №4. С. 542-545.
- Ткаченко К.С., Таразанов В.В. Экосистема Голубого озера, как пример карстового серного водоема с изолированной биотой // Известия Самарского научного центра РАН, 2009. Т.11, № 1. С. 140-145.
- Шимановский Л.А., Шимановская И.А. Пресные подземные воды Пермской области. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1973. 197 с.

## The Contemporary Chemical Composition of the Lakes Waters at Zone of Juncture of the Ufimian Swell and Pre-Urals Foredeep

V.N. Kataev, E.N. Kopantseva, I.G. Ermolovich

Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia

E-mail: [kataev@psu.ru](mailto:kataev@psu.ru); [elena.korotaeva.88@mail.ru](mailto:elena.korotaeva.88@mail.ru); [ermol@psu.ru](mailto:ermol@psu.ru)

The contemporary hydrochemical conditions of the Ust-Kishert lakes in the Kishert-Suksun karstic region of Perm Krai were evaluated and analyzed. Geological structure of the region corresponds to a narrow contact zone of carbonates of the Ufimian Swell (the eastern edge of the East European Platform) and terrigenous rocks of the western margin of the Pre-Urals foredeep. The study of the chemical composition of karstic lakes water allowed adding significantly to the conceptual hydrochemical model of the geological and hydrogeological structure of this complicated area.

Key words: *karst; karst lakes; chemical composition.*

### References

- Akhmedova N.S. 2011. Klassifikatsiya kotlovin karstovykh ozer mira po osobennostyam morfologicheskogo stroeniya na osnove klaster-nogo analiza [Classification of karstic lakes basins of the world using the morphological features and cluster analysis]. Obshchestvo. Sreda. Razvitie. 1:228-232. (in Russian)
- Akhmedova N.S. 2010. Osobennosti morfometricheskogo stroeniya razlichnykh tipov karstovykh ozer [Characteristics of morphometric structure of different types of karstic lakes]. In Geografiya: problemy nauki i obrazovaniya.

- LXIII Gertsenovskie chteniya. Mat. ezhegodnoy Vseross. nauch.-metod. konf., Sankt-Peterburg, Poligraf-Resurs, pp. 360-362. (in Russian)
- Gorbunova K.A. 1963. Vliyanie usloviy pitaniya i stadiy razvitiya na khimicheskiy sostav karstovykh ozer [Influence of feeding and formation stages conditions on the chemical composition of karstic lakes]. *Khimicheskaya geografiya i gidrogeokhimiya*. 2(3):73-80. (in Russian)
- Gorbunova K.A. 1965. Osobennosti gipsovogo karsta: putevoditel po Kishertsko-Suksunskomu karstovomu rayonu [Characteristics of the gypsum karst: Guidebook on the Kishert-Suksun karstic region]. Perm, p. 119. (in Russian)
- Gorbunova K.A., Butyrina K.G., Yashchenko R.V. 1967. Karstovye ozera [Karst lakes]. *Khimicheskaya geografiya vod i gidrogeokhimiya Permskoy oblasti*. 4(5):64-72. (in Russian)
- Gorbunova K.A. 1979. Morfologiya i gidrogeologiya gipsovogo karsta [Morphology and hydrogeology of gypsum karst]. Perm, Perm. Univ., p. 93. (in Russian)
- Gorbunova K.A., Maksimovich N.G. 1981. Tipy razgruzki karstovykh vod v rayonakh gipsoangidritovogo karsta [Types of karst waters discharging in the areas of gypsum-anhydrite karst]. *In Evropeiska regionalna konferencia po speleologii*, Sofia, pp. 439-441. (in Russian)
- Gorbunova K.A., Andreichuk V.N., Kostarev V.P., Maksimovich N.G. 1992. Karst i peshchery Permskoy oblasti [Karst and caves of Perm region]. Perm, Perm. Univ., p. 200. (in Russian)
- Kataev V.N. 2000. Gidrogeologicheskie usloviya Krasnoyasylskogo poligona: tipy vod, vodoproyavleniya i ikh khimizm [Hydrogeological conditions of Krasnoyasylskiy region: water types, water occurrences, and their chemical composition]. *In Gidrogeologiya i karstovedenie. Mezhevuz. sb. nauch. tr.*, Perm, Perm. univ., 13: 127-136. (in Russian)
- Kovaleva T.G., Kataev V.N. 2014. Podzemnyy relief karstuyushchikhsya porod kak indikator prostranstvennogo raspredeleniya form karsta [Subsurface relief of karstic rocks as an indicator of spatial distribution of karst forms]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 4. URL: [www.science-education.ru/118-14415](http://www.science-education.ru/118-14415) (in Russian).
- Kopylova N.S. 2014. Statisticheskie otsenki osnovnykh morfometricheskikh parametrov karstovykh ozer mira [Statistical evaluation of the morphometric parameters of karstic lakes of the world]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie*. 4:169-172. (in Russian)
- Maksimovich G.A. 1963. Osnovy karstovedeniya [Fundamentals of karstology]. Perm, Permskoe knizhnoe izd., T. 1, p. 444. (in Russian)
- Maksimovich G.A. 1969. Osnovy karstovedeniya [Fundamentals of karstology]. T.2, Geogr. Obshch. SSSR, Inst. karstovedeniya i speleologii, Perm univ., Perm, p. 529. (in Russian)
- Ryanzhin S.V., Ulyanova T.Y. 2000. Geograficheskaya informatsionnaya sistema "Ozera mira" - GIS WORLDLAKE [Geographical Information System "World's Lakes" - GIS WORLDLAKE]. *Doklady AN SSSR*. 370(4):542-545. (in Russian)
- Tkachenko K.S., Tarazanov V.V. 2009. Ekosistema Golubogo ozera, kak primer karstovogo sernogo vodoyoma s izolirovannoy biotoy [Blue lake ecosystem as an example of karstic sulfuric reservoir with isolated biota]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 11(1):140-145. (in Russian)
- Shimanovskiy L.A., Shimanovskaya I.A. 1973. Presnye podzemnye vody Permskoy oblasti [Fresh groundwaters of Perm resion]. Perm, Permskoe knizhnoe izd., p. 197. (in Russian)