Научная статья
УДК 556.55: 001.32
DOI: 10.31084/2619–0087/2021–3–8

О ПРОИСХОЖДЕНИИ ОЗЕРНЫХ КОТЛОВИН ЮЖНОГО УРАЛА И ПРЕДУРАЛЬЯ

Р. Ф. Абдрахманов

Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, 450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2, hydro@ufaras.ru

В статье рассматривается формирование озерных котловин Южного Урала и Предуралья (в пределах Башкортостана). Здесь насчитывается около 3000 озер естественного и искусственного происхождения. В западной части Башкортостана сформировались преимущественно старичные озера. В них происходит накопление лечебных грязей различного химического состава, представляющих большой интерес для курортологического лечения. Развитие цепочки озерных котловин и заболоченностей в основании Белебеевской возвышенности, наличие террас, сложенных песчано-галечниковыми отложениями и пр. свидетельствует о палеоэрозионно-тектоническом происхождении озер Асликуль и Кандрыкуль. В Зауральской части Башкортостана широко распространены озера эрозионно-тектонического происхождения. Химический состав воды в них в основном гидрокарбонатный кальциево-магниевый, кальциево-магниево-натриевый, магниево-натриевый, минерализация 0.20–0.87 г/дм^3, содержание гелия (He) в водах озер (10^{-5} мл/л). Состав воды озера Мулдаккуль отличается от остальных озер, он сульфатно-хлоридный магниево-натриевый с минерализацией 8.4–25 г/дм^3. Результаты He и изотопных исследований минеральных вод озера Мулдаккуль показали, что концентрация He в водах зоны Смеловского разлома достигает 3×10^{-2} мл/дм^3, что характеризует глубинный характер формирования вод. В Башкирском Предуралье распространены многочисленные карстовые озера, среди которых наиболее известны озера, образованные мощными карстовыми источниками — Красный ключ и Сарва. Рассматривается вопрос о формировании озера Солдатское в г. Уфа.

Ключевые слова: озерные котловины, Южный Урал и Предуралье, химический состав воды озер, старичные озера, озера эрозионно-тектонического происхождения, подпруженные озера

Благодарности: Работа выполнена по теме № 0246-2019-0086

Original article

ABOUT THE ORIGIN OF THE LAKE BASINS OF THE SOUTHERN URALS AND THE CIS-URALS

R. F. Abdrakhmanov

Institute of Geology, Ufa Federal Research Center of RAS, 16/2, K. Marx St., Ufa, 450077, Russia, hydro@ufaras.ru

The article considers the formation of lake basins, the Southern Urals and the Cis-Urals (within Bashkortostan). There are about 3000 lakes of natural and artificial origin here. In the western part of Bashkortostan, mainly dead channel lakes were formed. They accumulate therapeutic mud of various chemical compositions, which are of great interest for balneological treatment. The development of a

Для цитирования: *Р. Ф. Абдрахманов* О происхождении озерных котловин Южного Урала и Предуралья // Геологический вестник. 2021. № 3. С. 100–110. DOI: 10.31084/2619–0087/2021–3–8

For citation: R. F. Abdrakhmanov. (2021) About the origin of the lake basins of the Southern Urals and the Cis-Urals. *Geologicheskii vestnik*. 2021. No. 3. P. 100–110. DOI: 10.31084/2619–0087/2021–3–8

© Р. Ф. Абдрахманов, 2021

chain of lake basins and wetlands at the base of the Belebeyevskaya upland, the presence of terraces composed of sand and pebble deposits, etc. indicates the paleoerosion-tectonic origin of the lakes Aslikul and Kandrykul. Lakes of erosive and tectonic origin are widespread in the Trans-Ural part of Bashkortostan. The chemical composition of water in them is mainly bicarbonate calcium-magnesium, calcium-magnesium-sodium, magnesium-sodium, mineralization 0.20–0.87 g/dm^3, the content of helium (He) in the waters of lakes (10^{-5} ml/dm^3). The composition of the water of Lake Muldakkul differs from other lakes, it is sulfate-chloride magnesium-sodium with a mineralization of 8.4–25 g/dm^3. The results of He and isotope studies of the mineral waters of Lake Muldakkul showed that the concentration of He in the waters of the Smelovsky fault zone reaches 3×10^{-2} ml/dm^3, which characterizes the deep nature of water formation. Numerous karst lakes are common in the Bashkir Cis-Urals, among which the most famous lakes are formed by powerful karst springs — Krasny Klyuch and Sarva. The question of formation of the Soldatskoye Lake in Ufa is considered.

Keywords: lake basins, the Southern Urals and the Cis-Urals, the chemical composition of lake water, dead channel lakes, lakes of erosive-tectonic origin, dammed lakes

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the Theme No. *0246-2019-0086*.

Введение

В статье рассматривается формирование озерных котловин, преимущественно в пределах Башкортостана, где насчитывается около 3000 озер естественного и искусственного (пруды-озера) происхождения. По происхождению озерные котловины делятся:

- старичного (эрозионного) происхождения в долинах рек;
- остаточные озера прошлых водоемов;
- эрозионно-тектонического происхождения;
- карстовые озера;
- подпруженные (искусственно созданные) озера.

Суммарное количество озер с площадью менее 0.1 км^2 составляет около 1000 [Гареев, 2012]. По данным В. А. Балкова [1978] их количество — 800, из них 600 в западной и 200 в восточной части Башкирии.

Характеристика озер

Старичные озера. Большинство старичных озер в западной части Башкортостана расположены в основном в долинах рек Белой (73%), Демы (12%), Уфы (7%) и др. [Гареев, 2012]. Наиболее крупные из них Шамсутдин (площадь зеркала 1.52 км^2), Архимандритское (0.78 км^2), Каргинское (0.61 км^2), Максимовское (0.44 км^2), Кашкадан (0.15 км^2), Ольховое (0.44 км^2) и др.. Они обычно неглубокие, удлиненной формы (шириной до нескольких сот метров, длиной до нескольких км). Пополняются водой в паводковый период, часто имеют связь с рекой. Для таких озер характерны процессы эвтрофикации и заболачивания, постепенный переход их в болота. На дне некоторых озер развивается сапропель, который имеет важное курортологическое значение.

Наибольший интерес представляют минеральные грязи, развитые в старичных озерах р. Белой (оз. Сирянь-Туба, используемые на курорте Красноусольск), р. Ай (оз. Культубак, используемые в санатории Карагай), оз. Безымянное 1 (санаторий Якты-Куль) и др. Значительные скопления минеральных грязей развиты (млн. м^3): в Учалинском районе — 85, Абзелиловском — 35, Баймакском — 2. В озерах представлены следующие типы и разновидности лечебных грязей: иловые (минеральные) сульфидные, сапропелевые бессульфидные и торфяные бессульфидные.

Иловые грязи черного и темно-серого цвета формируются в небольших старичных, карстовых и неглубоких бессточных тектонических озерах, содержат менее 10% органических веществ, с запахом сероводорода. Ближайшими аналогами иловых сульфидных грязей являются иссыккульские Киргизии, шатковские Нижегородской области и сольвычегодские Архангельской области.

Сапропелевые грязи содержат более 10% разложившихся органических веществ (планктон, бентос). Они светло-серого, коричневого цвета. Состав раствора — гидрокарбонатный магниево-кальциевый. Ближайшими аналогами являются молтаевские грязи Свердловской и галичские Костромской областей.

Торфяные грязи имеют высокую степень разложения (более 40%) преимущественно органического состава (50% на сухое вещество). Формируются в основном в пойменных и низинных торфяниках. В Башкортостане известно свыше 500 месторождений. Аналогом являются «фиолетовые» грязи Армении, «варзиятчинские» Удмуртии.

В настоящее время ресурсы лечебных грязей в Башкортостане представлены 31 месторождением: 10 — иловых сульфидных, 9 — сапропелевых

и 12 — торфяных. Общие запасы составляют 33943 тыс. м³ (иловых сульфидных — 546, сапропелевых — 28291 и торфяных 5206). Из выявленных запасов лечебных грязей 854 тыс. м³ соответствуют категории А, 131.6 тыс. м³ — категории В и 966 тыс. м³ категории C_2 [Абдрахманов, 2014].

Остаточные озера прошлых водоемов. К таким озерам относятся наиболее известные озера Асликуль (площадь зеркала 23.6 км², максимальная глубина 8 м) и Кандрыкуль (площадь зеркала 15.6 км², глубина 15.6 м), озера проточные.

О происхождении этих озер есть разные мнения (гипотезы). В печати, и даже научных публикациях их происхождение связывают с карстовым процессом. Хотя еще в 1957 г. В. Вахрушев четко обосновал их происхождение как палеоэрозионное. Он отмечал, что «…в юго-западной части Башкирии … на участках молодых поднятий постепенно усыхают наземные воды, … данные озера приурочены к довольно возвышенной части описываемого района, которая в течение верхнего плиоцена и четвертичного периода испытывала поднятие. Последнее, как видно, и является основной причиной прогрессивного усыхания этих озер и исчезновения других озер (более десяти), недавно существовавших в данном районе. Расположение этих озерных котловин показывает, что они составляют как бы одну цепь, соединяющую современные долины рек Демы и Ика. Очень вероятно, что в конце третичного и в первой половине четвертичного периода эти котловины представляли собою систему проточных озер. Может быть, какая-то р. «Палеодема» несла свои воды через эти озера в р. «Палеоик», впадавшую в «Палеокаму». По-видимому, во второй половине четвертичного периода местность между Кандрыкулем и заболоченной низиной у с.Телякей-Кубово поднялась и разделила эту систему озер на две части. В связи с этим стала перестраиваться здесь и речная сеть, приближаясь к современному ее состоянию» [Вахрушев, 1957]. Развитие цепочки озерных котловин и заболоченностей в основании Белебеевской возвышенности, наличие террас (до 2), сложенных песчано-галечниковыми отложениями и пр. свидетельствует, по нашему мнению, именно о палеоэрозионно-тектоническом происхождении этих озерных котловин [Абдрахманов, 2014]. 15–20 лет назад наблюдался подъем уровня воды озера Кандрыкуль на несколько метров, и началось подтопление дороги Уфа — Самара, при строительстве которой было перекрыто русло стока из озера. В связи с этим пришлось построить водопропускное сооружение под дорогой. Расход воды на этом водопропускном сооружении составил 200–250 л/с. В последнее десятилетие уровень озера опять понизился. Причина подъема, как и Каспийского моря, пока неясна. Гипотез этого явления достаточно много (климатические, геоморфологические, геолого-тектонические, солнечной цикличности («цикл Швабе») и пр.), но все они пока не дают удовлетворительного ответа.

Химический состав озер формируется в результате разгрузки солоноватых (до 3 г/дм³) сульфатных кальциевых вод из уфимских отложений пермской системы. Состав воды Асликуля и Кандрыкуля гидрокарбонатно-сульфатный натриево-магниевый, тип II, М — 1.2–1.9 г/дм³, pH 8.5–8.98 (табл. 1).

Согласно исследованиям Ф. Б. Шкундиной [2005] в озере Кандрыкуль весной начинается массовое размножение диатомовых, затем зеленых и цианобактерий, а в конце лета развиваются динофитовые бактерии. Биомасса фитопланктона изменяется по площади от 6.2 до 175.8 мкг/см² Осенью наблюдается вторая вспышка в размножении диатомовых. Зоопланктон состоит из коловраток, ветвистоусых и веслоногих рачков. Наибольшего количества зоопланктон достигает в середине лета, когда появляется кормовая база — водоросли. В средний вегетационный период численность составляет 84050 тыс. кл/л, а средняя биомасса — 6.88 г/м³.

Озера эрозионно-тектонического происхождения. Такие озера широко распространены

Таблица 1. Химический состав озерных вод
Table 1. Chemical composition of lake waters

№ п/п	Водоемы	pH	M, г/дм³	Ингредиенты, мг/дм³, %-моль						Индекс состава воды
				HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^++K^+	
1	Асликуль	8.98	1.88	176 29.0	847 65.4	53.4 5.6	32.1 5.9	158 48.0	308 46.1	CS_{II}^{NaMg}
2	Кандрыкуль	8.5	1.19	377.8 36.1	497.9 60.5	20.6 3.4	48.1 14.0	115.5 55.4	120.5 30.6	CS_{II}^{NaMg}

в Зауральской части Башкортостана (Учалинский и Абзелиловский районы) и приурочены к бассейнам рек Урала (Большой и Малый Кизил, Янгелька и др.) и Оби (Миасс, Уй и др.), в основном проточные. Озера неглубокие (до 10 м), только глубина озера Банное (Яктыкуль) достигает 28 м. Формировались они в результате проявлений дифференцированных вертикальных движений земной коры в условиях развития равнинного рельефа в долинах рек, как изолированные водоемы различной эпохи плейстоцена под совокупным воздействием двух факторов: дифференцированных новейших движений (поднятий) и изменившихся климатических условий. Некоторые озера (Мулдаккуль) образовались в переуглубленных долинах рек плиоценовых логов, приуроченных к тектоническим трещинам [Грамматчикова, 1974; Рождественский, Зиняхина, 1997]. Наиболее глубокие озера имеют тектоническое происхождение. Параметры основных озер приводятся в табл. 2.

Вода озер этого региона (за исключением оз. Мулдаккуль) имеет в основном гидрокарбонатный кальциево-магниевый, кальциево-магниево-натриевый, магниево-натриевый состав, геохимический тип I (содовый), минерализацию 0.20–0.87 г/дм^3, pH 7.2–8.6 (табл. 3). Реже состав их хлоридно-гидрокарбонатный гидрокарбонатно-сульфатный, сульфатно-гидрокарбонатный хлоридный магниево-натриевый и натриевый. Минерализация последних достигает 3.89 г/дм^3.

Далее приводим особенности формирования озера Мулдаккуль, наиболее интересного из озер Зауральской группы с точки зрения тектонического формирования и особенностей химического состава.

Озеро Мулдаккуль расположено в 12 км западнее г. Магнитогорск и представляет замкнутый бессточный котлован площадью ~6.3 км^2 (3.0×2.1 км). Площадь в зависимости от водности года значительно меняется, что влияет на минерализацию (8.4–25 г/дм^3) воды и глубину (3–4 м) озера. Химический состав воды сульфатно-хлоридный магниево-натриевый. На дне залегает грязь мощностью до 1.5–2.0 м с запасами, по данным Н.П. Номеровского [1938 г.] 380 тыс. м^3, а Л.С. Ивановой и Г.М. Эпштейна [1961 г.] 115 тыс. м^3 (66 тыс. м^3 — темной, 49 тыс. м^3 — серой грязи).

Озеро в геолого-тектоническом отношении приурочено к Мулдаккульской синклинали, сло-

Таблица 2. Параметры наиболее крупных озер Башкирского Зауралья
Table 2. Parameters of the largest lakes of the Bashkir Trans-Urals

Название	Абс. отм., м	Площадь водосбора, км^2	Глубина, м		Длина, км	Ширина, км	Площадь зеркала воды, км^2	Объем воды, млн. м^3
			сред.	макс.				
Банное (Яктыкуль)	438.0	36.3	10.7	28	4.1	1.88	7.7	81.7
Ургун	512.6	39.1	5.2	7.7	3.6	1.89	6.8	34.3
Култубан	371.3	—	4	5.2	3.4	2.18	7.4	29.5
Атавды	406.0	69.8	3.4	6.5	4	2.08	8.3	28.6
Суртанды	407.0	57.8	1.5	4	4.6	1.61	7.4	21
Талкас	548.2	—	4.5	12	3.95	0.9	3.91	15.8
Мулдаккуль	406.0	49.6	2.1	2.5	3.1	2	6.2	13.1
Карагайлы	517.1	22	3.2	8.3	2.52	1.51	3.8	12.3
Карабалыкты	407.0	18.3	3.5	6	2.12	1.23	2.6	9.6
Узункуль	497.1	36.5	2	4	3.8	1.21	4.6	9.2
Б. Учалы	510.5	23.5	2.5	5.5	2.8	1.11	3.1	8.04
Сабакты	437.0	—	2.9	6	2.37	1.01	2.4	7.2
Ю. Улянды	422.0	—	1.7	2.3	2.3	1	2.36	6.4
Сев. Улянды	413.0	—	2.2	3.5	2.2	1	2.2	4.8
Калкан	511.5	9	2.4	4.7	2.6	0.65	1.7	4.2

Таблица 3. Химический состав озерных вод Башкирского Зауралья
Table 3. Chemical composition of lake waters of the Bashkir Trans-Urals

№ п/п	Водоемы	pH	M, г/дм^3	Ингредиенты, мг/дм^3, %-моль						Индекс состава воды
				HCO^{3-}	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^++K^+	
1	Калкан	8.3	0.46	358.8 94.1	12.3 4	3.5 1.6	28 21.9	53.5 69	13.3 9.1	C_I^{CaMg}
2	Ургун	8.4	0.43	320.2 91.8	8.2 3	10.6 5.2	28 24.3	44.4 63.2	16.6 12.5	C_I^{CaMg}
3	Бол. Учалы	8.1	0.34	225.7 81.1	16.4 7.4	16.8 9.9	24 26.3	25.5 46.1	29 27.6	C_I^{CaNaMg}
4	Карагайлы	8.4	0.23	152.3 86.4	16.4 10.6	3.5 3.2	19 29.7	10.3 26.7	32 43.6	C_I^{MgCaNa}
5	Гнилое	8.05	0.29	201.2 90.3	12.3 7	3.5 2.7	14 18.8	15.8 35.1	39.3 46.1	C_I^{MgNa}
6	Карагайское	8.2	0.45	283.6 77.75	32.9 11.3	23.1 10.8	47.1 39.1	22.5 30.9	41.4 30	C_I^{NaMgCa}
7	Чебачье	8.6	0.77	543.2 93.6	28.8 5.9	1.8 0.5	21 10.3	39.5 31.9	135.7 57.8	C_I^{MgNa}
8	Узун-куль	8.3	0.20	143.3 89.9	8.2 6.4	3.5 3.7	19 25.6	12.2 37.5	16.6 26.9	C_I^{CaNaMg}
9	Юж. Улянды	7.4	3.89	927.2 31.7	634.3 26.4	802.3 41.9	14.0 1.2	142.7 19.3	1111.7 79.6	$SCCl_I^{Na}$
10	Банное	8.47	0.24	158.6 81.8	21 13.8	5 4.4	32.1 50.3	10.9 28.3	15.6 21.4	C_I^{NaMgCa}
11	Суртанды	7.4	0.87	427.0 67.6	65.0 13.0	71.0 19.3	28.0 11.2	56.12 36.7	150.5 52.2	C_I^{MgNa}
12	Бурсунды	7.2	0.87	500.2 80.6	56.8 11.6	28.4 7.9	32.0 13.2	61.0 41.1	128.1 45.8	C_I^{MgNa}
13	Атавды	7.1	2.23	866.2 49.8	203.4 14.9	355.0 35.3	20.0 3.1	85.40 21.4	567.8 75.5	ClC_I^{MgNa}
14	Сухое	6.9	2.73	518.5 19.4	109.5 5.3	1171.5 75.3	108.0 12.2	102.5 18.9	703.0 68.9	Cl_{IIIa}^{Na}
15	Улянды	7.4	1.07	408.7 37.9	146.1 45.2	106.5 17.0	32.0 10.1	56.6 30.2	219.1 59.8	CS_{II}^{MgNa}
16	Талкас	8.56	0.27	189.1 89.3	2.8 7.8	3.6 2.9	2.1 46.1	2.2 8.9	20 25	C_I^{NaCa}
17	Култубан	8.35	0.65	427 82.3	6.3 6.4	34.1 11.3	32.1 18.8	1.6 30.6	99.1 50.6	C_I^{MgNa}
18	Водохранилище оз.Чебаркуль	6.9	0.42	237.9 77.7	9.5 6.4	28.4 15.9	2.0 4.1	4.4 33.9	30.0 22.0	C_I^{NaMg}
19	Мулдаккуль	8.5	10.8	488.0 4.3	1770 19.9	4986 75.8	1660 4.5	738.1 32.7	2674 62.8	SCl_{IIIa}^{MgNa}

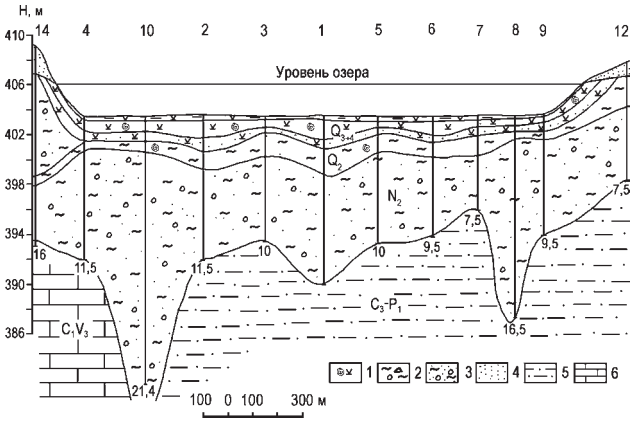

Рис. 1. Геологический разрез Мулдаккульской озерной котловины [Грамматчикова, 1974] с изменениями

1 — сапропель с фауной, 2 — глины с галькой и обломками пород, 3 — глинистые пески с галькой, 4 — пески, 5 — песчаники, гравелиты, конгломераты; 6 — известняки; вверху — номера скважин

Fig. 1. Geological section of the Muldakkul lake basin [Grammatchikova, 1974] with changes

1 — sapropel with fauna, 2 — clays with pebbles and fragments of rocks, 3 — clay sands with pebbles, 4-sands, 5 — sandstones, gravelites, conglomerates; 6 — limestones; top — well numbers

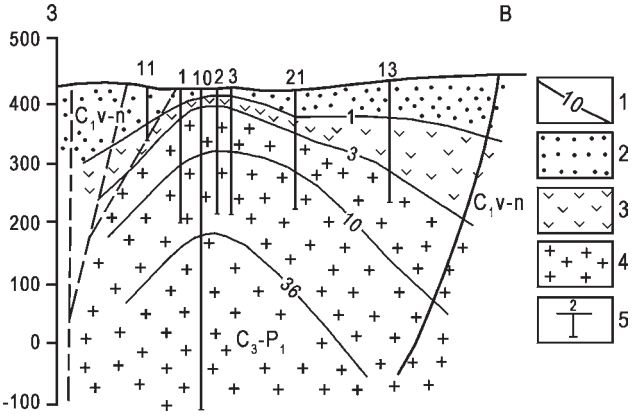

Рис. 2. Гидрогеохимический разрез в районе оз. Мулдаккуль [Абдрахманов, 2014]

1 — изолиния М воды (г/дм³); 2–4 — гидрогеохимические зоны: 2 — гидрокарбонатная, 3 — сульфатно-хлоридная, 4 — хлоридная; 5 — скважина и ее номер

Fig. 2. Hydrogeochemical section in the lake area Muldakkul [Abdrakhmanov, 2014]

1-isoline M of water (g/dm³); 2–4 — hydrogeochemical zones: 2 — bicarbonate, 3 — sulfate-chloride, 4 — chloride; 5 — well and its number

женной породами палеозойского (C_1V_3, C_3-P_1) и мезозойско-кайнозойского (N_2, Q_2, Q_{3-4}) возраста. В районе озера развиты породы янгельской свиты вулканогенно-осадочного происхождения (рис. 1).

Породы янгельской свиты отличаются сильной фильтрационной анизотропностью как по площади, так и по разрезу. Она обусловлена совокупным воздействием двух главных факторов — тектонического и литологического. Питание верхней части янгельского водоносного комплекса (глубина < 80–100 м), содержащей маломинерализованные воды, происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков. В формировании минеральных вод нижней части комплекса участвуют перетоки высокоминерализованных растворов из нижележащих толщ среднего и нижнего карбона. Разгрузка подземных вод происходит в озеро Мулдаккуль.

В результате восходящей разгрузки по зоне разлома глубинных соленых, возможно рассольных, вод и смешения их с пресными инфильтрационными водами в озерной котловине Мулдаккуль в янгельском водоносном комплексе сформировалась контрастная куполовидная гидрогеохимическая аномалия (рис. 2). Размещение в ней минеральных вод подчинено нормальной гидрогеохимической зональности, выражающейся в росте с глубиной минерализации вод и одновременном изменении их ионно-солевого состава.

Верхняя зона мощностью 50–80 м представлена SO_4-HCO_3 и Cl-HCO_3 водами с минерализацией 0.4–1.0 г/дм³. Они принадлежат к I (содовому) или II (сульфатно-натриевому) геохимическим типам. Содержание в водах $NaHCO_3$ достигает 29%, а Na_2SO_4 15%.

Ниже до глубины 100 м расположена зона SO_4-Cl вод типа IIIа (хлормагниевого) с минерализацией 1–3 г/дм³. Под ней до глубины 500 м находится зона хлоридных вод типов IIIб (хлоркальциевого) или IIIа с минерализацией до 37.2 г/дм³. Катионный состав вод в пределах всех зон — двух- и трехкомпонентный: Mg-Na, Mg-Ca, Ca-Na, Ca-Mg-Na. Наибольшей сложностью он отличается в верхней зоне наименее минерализованных вод.

С глубиной по мере роста минерализации в водах происходит снижение величины pH (от 7.0 до 6.0) и увеличение концентрации свободной CO_2 (от 13 до 97 мг/дм³). Наиболее минерализованная вода, выведенная скважиной 10 с глубины 350 м, имеет следующий состав:

$$He N_2 M\,37{,}2 \frac{Cl96 SO_4 4}{Na65 Ca31 Mg4}\, pH\,6{,}0.$$

Солевой состав минеральных вод также довольно сложный. Обычно в нем преобладают NaCl, $MgCl_2$ и $CaCl_2$, общий вклад которых в фор-

мирование минерализации составляет 70–90%. Подчиненное положение занимают $MgSO_4$, $CaSO_4$ и особенно $Ca(HCO_3)_2$. В водах Cl-Ca-Na состава с минерализацией > 15–20 г/дм³ содержание специфической соли $CaCl_2$, определяющей хлоркальциевый геохимический тип вод, достигает 29% (скв. №№ 2, 10, 14). Но наиболее обогащены $CaCl_2$ (53–70%) воды с относительно невысокой минерализацией (2.4–4.6 г/дм³), залегающие на глубине 120–180, иногда 60–120 м, в скважинах 13 и 15, наиболее удаленных от озера Мулдаккуль. В воде скважин, расположенных в прибрежной части озера, концентрация $CaCl_2$ ниже, а в некоторых скважинах (№№ 3, 12, 21) глубиной 140–180 м эта соль в водах вообще отсутствует. $CaCl_2$, как известно, отражает глубинную обстановку формирования подземных вод с квазизастойным гидрогеодинамическим режимом, показателем которой является коэффициент метаморфизации rNa/rCl. В исследуемых водах он снижается до 0.7–0.4, т. е. значительно меньше, чем для нормальной морской воды (rNa/rCl 0.87).

Минеральные воды отличаются повышенным содержанием микроэлементов талассогенного и биогенного происхождения (мг/дм³): Br < 33.9

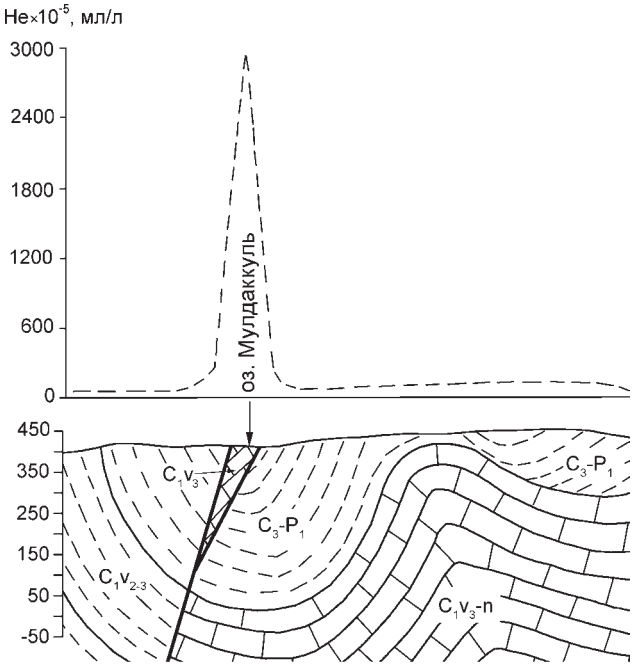

Рис. 3. Содержание гелия в подземных водах в районе оз. Мулдаккуль [Абдрахманов, 2014]

Усл. обозначения см. на рис. 1

Fig. 3. The content of helium in underground waters in the lake area Muldakkul [Abdrakhmanov, 2014]

See Fig. 1 for the standard designations

(наиболее часто встречающееся значение 15–20), H_3BO_3 < 20.0 (8–14), I < 2.0 (0.8–1.3), F < 1.25 (0.2). Концентрация ОВ колеблется (мг/дм³): нейтральные вещества (смолы, масла) 5.6–9.2, кислые битумы (нафтеновые кислоты, кислые битумы) 4.8–6.6, спирторастворимые вещества (спиртовые смолы, гумусовые вещества) 5.2–8.34. Суммарное содержание ОВ составляет 19.2–23.6 мг/дм³. Радиоактивные элементы определены в воде скважины 10 в количестве: U 6×10^{-5} мг/дм³, Sr^{-2} 14.95–15.1 мг/дм³, а ^{90}Sr 1×10^{-12} Ки/дм³.

Большой интерес представляют результаты гелиевых и изотопных исследований минеральных вод. Концентрация гелия в водах зоны Смеловского разлома достигает 3×10^{-2} мл/л (рис. 3). По мере удаления от нее гелиеносность вод резко снижается и не превышает фонового в неглубокозалегающих инфильтрогенных водах атмосферного питания (5×10^{-5} мл/л). Такое распределение гелия служит дополнительным свидетельством разгрузки глубинных вод по проницаемой зоне тектонического нарушения.

Минеральные воды отличаются не только ионно — солевым, микрокомпонентным и газовым составом, но и изотопным составом водорода и кислорода растворителя H_2O, отражающем условия формирования и генезис вод. Постоянны концентрации изотопов водорода ^2H (D) и кислорода ^{18}O в водах Мирового океана, который принят за стандарт (SMOW). Он равен для дейтерия (RD_{SMOW}) 0.0158%, а для ^{18}O ($R^{18}O_{SMOW}$) — 0.1933%. При изотопных исследованиях содержание D и ^{18}O принято давать не в абсолютных величинах, а в относительных единицах стандарта (δ, ‰), отражающих отклонения от содержания этих изотопов в океанической воде:

$$\delta = \frac{R_{пр} - R_{SMOW}}{R_{SMOW}} \times 10^3 \text{ ‰},$$

где $R_{пр}$ и R_{SMOW} — изотопные отношения ($D/^1H$ и $^{18}O/^{16}O$) в пробе воды и стандарте SMOW.

Таким образом, для океанической воды $\delta D_{SMOW} = 0$ и $\delta^{18}O_{SMOW} = 0$. Положительные значения δD и $\delta^{18}O$ свидетельствуют об «утяжелении» исследуемой воды относительно стандарта, а отрицательные — об «облегчении».

Изотопный состав природных вод подвержен значительным колебаниям вследствие фракционирования изотопов H и O под влиянием процессов испарения и конденсации, обмена с породами, газами и др. Процессы фракционирования изотопов в атмосферных и поверхностных водах гумидных

областей Земного шара отражены в выведенном Х. Крейгом уравнении:

$$\delta D = 8\delta^{18}O + 10.$$

Графическим выражением этого уравнения служит прямая линия, получившая название линии Крейга. Для выяснения вопросов формирования подземных вод с ней сравнивают фактические данные изотопных исследований.

Инфильтрогенные Cl–Na рассолы отличаются пониженными и низкими содержаниями дейтерия (δD ‰ = –110… — 170) и, таким образом, сильно отличаются от океанической воды (рис. 4). Метеогенный генезис растворителя подчеркивается близостью фигуративных точек рассолов этого состава к линии Крейга атмосферных и поверхностных вод суши. Фигуративные точки седиментогенно-эпигенетических Cl–Ca рассолов тяготеют к прямой, расположенной правее линии Крейга. Они «утяжелены» относительно Cl–Na рассолов

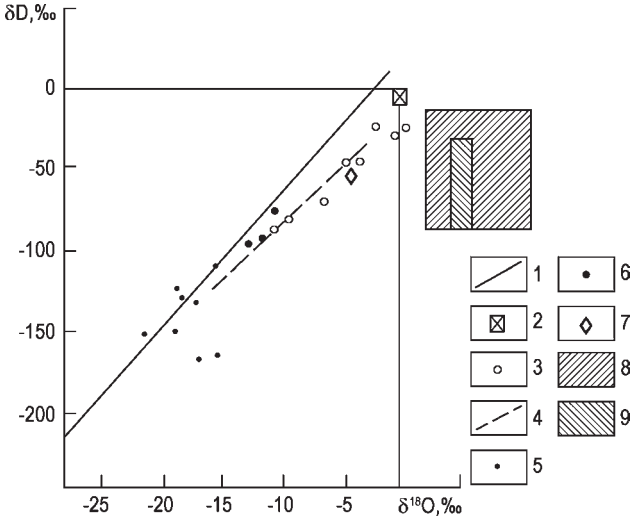

Рис. 4. Мулдаккульские минеральные воды на диаграмме изотопного состава генетических типов природных вод [Абдрахманов, 2014]

1 — линия Крейга метеогенных и поверхностных вод, 2 — стандарт океанической воды (SMOW), 3 — седиментогенные хлоридные кальциевые рассолы, 4 — линия хлоридных кальциевых рассолов, 5 — инфильтрогенные хлоридные натриевые рассолы 6 — Мулдаккульские минеральные воды, 7 — вода озера Мулдаккуль 8 — метаморфогенные воды; 9 — ювенильные воды.

Fig. 4. Muldakkul mineral water on the diagram of the isotopic composition of genetic types of natural waters [Abdrakhmanov, 2014]

1 — Craig line of meteogenic and surface waters, 2 — ocean water standard (SMOW), 3 — sedimentogenic calcium chloride brines, 4 — calcium chloride brine line, 5 — infiltrogenic sodium chloride brines 6 — Muldakkul mineral waters, 7 — Muldakkul Lake water 8 — metamorphogenic waters; 9 — juvenile waters.

(δD ‰ = –90… — 20) и «облегчены» по сравнению с водой Мирового океана.

Исследуемые минеральные воды (скв. №№ 10 и 11) занимают промежуточное положение (δD‰ = –101… — 78, $\delta^{18}O$‰ = –11… — 13) между линией Крейга и седиментогенными рассолами, что подчеркивает их смешанное инфильтрогенно-седиментогенное происхождение. Отличается по изотопному составу и вода оз. Мулдаккуль, для которой δD‰ = –52.7, $\delta^{18}O$‰ = –4.5. Положение фигуративной точки на рис. 4. указывает, что вода в озере подвержена значительному испарительному концентрированию.

Судя по литолого-фациальному облику терригенных и карбонатных толщ каменноугольного и нижнепермского возраста в районе Мулдаккульского месторождения минеральных вод широкое развитие получили морские и лагунные палеобассейны с водами Cl-Mg-Na состава повышенной солености (36–150 г/дм^3). На это указывает загипсованность терригенных отложений янгельской свиты. Лагунно-морские бассейны с солеными и рассольными водами, судя по палеогеографическим данным, существовали также в турнейское и визейское аремя. Поэтому следует полагать, что высокоминерализованные седиментогенные воды свойственны не только янгельской свите, но и глубоким осадочным комплексам нижнего карбона.

Таким образом, в ходе седиментогенеза талассогенные растворы карбона и нижней перми были захоронены в горных породах и явились первоосновой подземных седиментогенных вод. В дальнейшем на стадии эпигенеза Cl-Mg-Na воды были превращены в растворы Cl-Ca типа под влиянием процессов метаморфизации в системе «вода — порода» (альбитизации, доломитизации, обменной адсорбции):

$$CaAl_2Si_2O_8 \text{ (анортит)} + 2NaCl \text{ (вода)} + 4SiO_4 = 2NaAlSi_3O_8 \text{ (альбит)} + CaCl_2 \text{ (вода)};$$

$$2CaCO_3 \text{ (известняк)} + MgCl_2 \text{ (вода)} = CaCO_3{\times}MgCO_3 \text{ (доломит)} + CaCl_2 \text{ (вода)};$$

$$2NaCl \text{ (вода)} + Ca^{2+} \text{ (адс.)} = CaCl_2 \text{ (вода)} + 2Na^{+} \text{ (адс.)};$$

$$MgCl_2 \text{ (вода)} + Ca^{2+} \text{ (адс.)} = CaCl_2 \text{ (вода)} + 2Mg^{2+} \text{ (адс.)}$$

Геостатическое сжатие пород вызвало поступление поровых и связанных вод в коллекторы, увеличение в них пластовых давлений и напоров вод и, как следствие, восходящую миграцию Cl-Na-Ca рассолов по проницаемой зоне Смеловского разлома в приповерхностную зону, где произо-

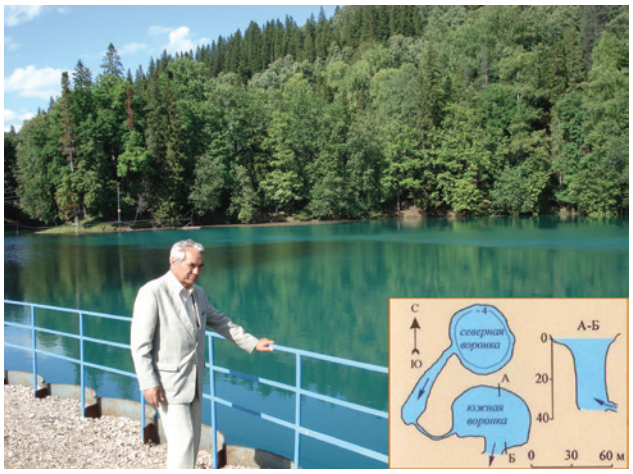

Рис. 5. Источник Красный ключ. Фото автора, вставка [Карст…, 2002]

Fig. 5. The spring Krasnyi Klyuch. Photo of the author, insert [Karst…, 2002]

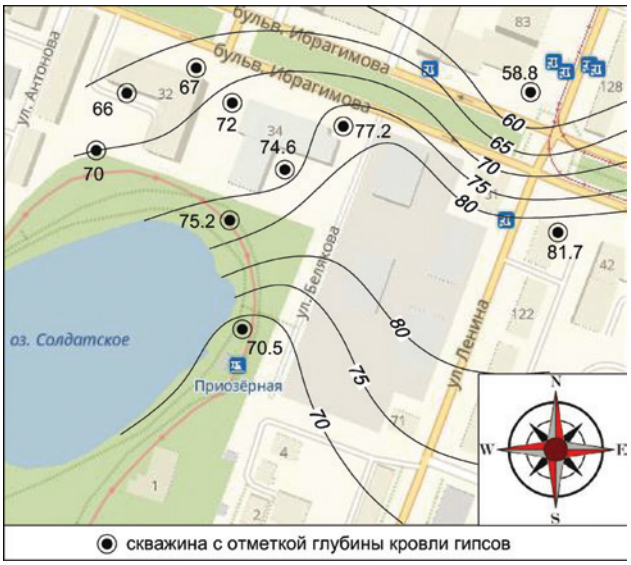

Рис. 6. Озеро Солдатское. Схема кровли гипсов кунгура [Камалов, Барышников, 2019]

Fig. 6. Soldatskoe Lake. The scheme of the roof of gypsum of Kungur [Kamalov, Baryshnikov, 2019]

шло смешение их с маломинерализованными инфильтрогенными SO_4-HCO_3 водами. Обменно-адсорбционные процессы протекают не только в глубинных условиях, но, вероятно, и в верхних частях янгельского разреза, куда поступают Cl-Mg-Na растворы. На это, в частности, указывают очень высокое содержание в минеральных водах $CaCl_2$ (до 50–70 %) на относительно небольших глубинах (60–180 м).

Карстовые озера. В Башкирском Предуралье известны многочисленные карстовые озера. Для них характерны округлые формы, размер их обычно от нескольких метров (молодые карстовые провалы) до сотен метров. По мере формирования воронок размеры их увеличиваются. Обычно карстовые озера имеют глубину от 3–5 до 10–25 м с характерной для гипсового карста холодной голубоватой водой. Для карстовых озер также характерно исчезновение (уход в поноры в основание воронок) и вновь восстановление через некоторое время. В зоне развития карбонатного карста известны уникальные карстовые озера — источники «Красный Ключ» с дебитом от 5000 до 58000 л/с» (рис. 5) и «Сарва» — 350 л/с. Источник Красный Ключ разгружается в зоне подпора русла палеодолины р. Уфы неогеновыми отложениями.

Считаю далее необходимым остановиться на ***проблеме формирования котловины озера «Солдатское»*** в г. Уфе. В научной литературе и печати происхождение озера трактуется как карстовое явление. Длительными исследованиями треста ЗапУралТИСИЗ [Карст…, 2002] установлено, что в условиях закрытого подкласса на междуречьях (в районе озера Солдатского развит такой подкласс) карст на поверхности (карстующиеся породы — гипсы) проявляется при мощности перекрывающих карстующиеся породы некарстующимися (песчаники, глины и др.) менее 60 м. Как видно из рисунка 6 в районе озера хорошо наблюдается уклон кровли карстующихся гипсов кунгурского яруса и в целом рельефа в северо-восточном направлении в сторону оврага по ул. К. Маркса (бывшая Александровская), мощность некарстующихся пород составляет от 66 до 80 м [Камалов, Барышников, 2019]. При образовании крупных провалов обычно происходит оседание (трещины отрыва) склонов и образование мелких воронок вокруг основного провала на расстоянии до нескольких десятков метров. В 1974 г. во время очистки озера вся площадь дна характеризовалась спокойным залеганием пород (трещиноватые песчаники, глины, известняки уфимского возраста), отсутствием характерных для карстовых котловин форм (мелких воронок, поноров и пр.). При очистке дна вода озера ушла в трещиноватые породы. При восстановлении озера пришлось провести специальные работы по кольматации этих трещин. Как видно из рисунка 7 весь район (ул. Цюрупы, Ленина, Мустая Карима, Карла Маркса и др.), примыкающий к озеру, характеризуется ровным рельефом, отсутствием карстопроявлений. В настоящее время северная, северо-восточная часть

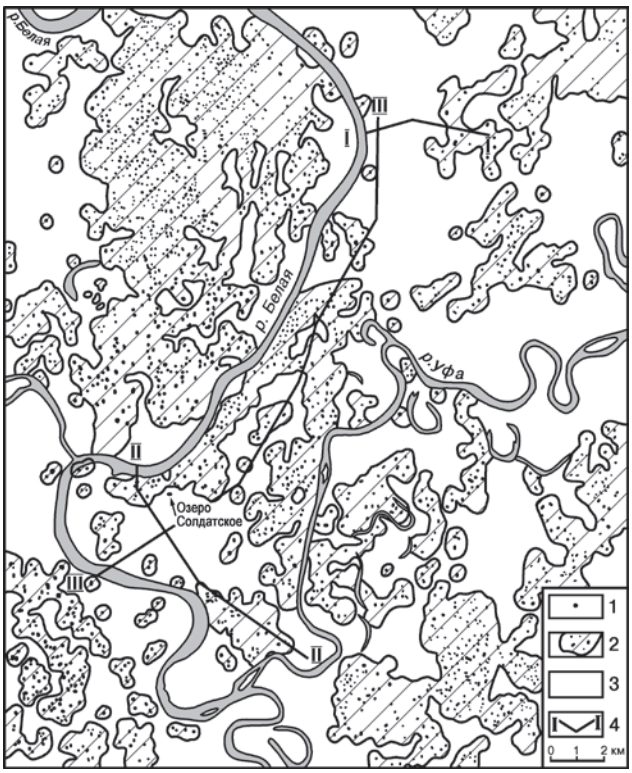

Рис. 7. Карта закарстованности территории г. Уфы [Абдрахманов, Мартин, 1993]

1 — карстовые воронки и провалы (территории неустойчивые и очень неустойчивые для строительства); 2 — территории вокруг воронок (недостаточно устойчивые и несколько пониженной устойчивости); 3 — территории за пределами карстовых полей (относительно устойчивые); 4 — линия гидрогеологического разреза

Fig. 7. Map of the karst area of the city of Ufa [Abdrakhmanov, Martin, 1993]

1 — karst craters and sinkholes (territories unstable and very unstable for construction); 2 — territories around craters (insufficiently stable and somewhat reduced stability); 3 — territories outside karst fields (relatively stable); 4 — hydrogeological section line

берега озера интенсивно застраивается многоэтажными зданиями.

По свидетельству старожилов по оврагу, примыкающему к улице Александровской (К. Маркса) протекал ручей (родники — начало ручья, разгружаются в настоящее время в озеро). В свое время в расширяющейся верхней части оврага построили пруд в противопожарных целях и для купания, водопоя лошадей. Со временем пруд расширили и обустроили. Мне кажется это предположение об образовании озера Солдатское ближе к истине. Аналогичное происхождение (пруд) имеет озеро в парке имени С. Т. Аксакова (бывший парк им. А. В. Луначарского), созданное в 1822 г. ***Подпруженные (искусственно созданные) озера.*** В Башкортостане по разным оценкам существуют более 500 прудов и малых водохранилищ размером от 0.1–0.5 до 10–20 млн. м^3. Они создаются в суженных участках рек. Некоторые проточные озера (Белое в долине реки Белой, Чебаркуль на р. Янгелька в Зауралье, и др.) в практических целях подпруживаются плотинами, увеличивая объем этих озер. В малых водохранилищах и прудах, происходит процесс эвтрофирования (зарастания) аналогичный старичным озерам и превращения их в болота.

Заключение

Изучение процессов формирования озерных котловин имеет не только научное, но и практическое значение. Оно интересно с точки зрения развития экзогенных процессов в различных геолого-геоморфологических условиях. В озерах, малых водохранилищах, особенно прудах, происходят процессы накопления органо-минеральных веществ. В результате этого происходит изменение качества воды, эвтрофирование (зарастание) водоемов и превращения их в болота. Для предотвращения старения и обмеления озер существуют различные методы, которые зависят от вида озерных котловин. Однако техногенное загрязнение водоемов, которое все увеличивается в последние годы, может резко изменить процессы, происходящие в них.

Список литературы:

Абдрахманов Р. Ф. Пресные подземные и минеральные лечебные воды Башкортостана. Уфа: Гилем, Башк. энцикл., 2014. 416 с.

Абдрахманов Р. Ф., Мартин В. И. Гидрогеоэкология г. Уфы. Уфа: УНЦ РАН, 1993. 44 с.

Карст Башкортостана. Р. Ф. Абдрахманов, В. И. Мартин, В. Г. Попов, А. П. Рождественский, А. И. Смирнов, А. И. Травкин. Уфа: Информреклама, 2002. 383 с.

Балков В. А. Водные ресурсы Башкирии. Уфа: Башкнигоиздат, 1978. 173 с.

Вахрушев Г. В. О неотектонике Южного Предуралья // Вопросы геологии и геоморфологии Башкирии/БФ АН СССР. Уфа, 1957. Сб. 1. С. 39–48.

Гареев А. М. Реки, озера и болотные комплексы Республики Башкортостан. Уфа: Гилем, 2012. 248 с.

Грамматчикова Н. М. Геоморфология и палеогеография северной части восточного склона Южного Урала и формирование озерных котловин Учалинской группы: Автореф. дис. … к.г.-м.н./Казанский госуниверситет. Казань, 1974. 19 с.

Камалов В. Г., Барышников В. И., Опасные геологические процессы на территории Уфимского «полуострова»

(Инженерная геодинамика). Уфа: Информреклама, 2019. 240 с.

Рождественский А. П., Зиняхина И. К. Развитие рельефа Южного Урала в кайнозое. Неогеновый период. Уфа: УфНЦ РАН, 1997. 45 с.

Шкундина Ф. Б. Мониторинг экологического состояния природного парка Кандрыкуль по фитопланктону // Вклад ООПТ в экологическую устойчивость региона. Матер. конф., посвящ. 75-летию БГПЗ (Уфа, сентябрь, 2005 г.). Уфа, 2005. С. 134–135.

References

Abdrakhmanov R. F. Presnye podzemnye i mineral'nye lechebnye vody Bashkortostana [Fresh Groundwater and Mineral Medicinal Water Reserves of Bashkortostan]. Ufa: Gilem, Bashkir Encyclopedia Press. 2014. 416 p.

Abdrakhmanov R. F., Martin V. I. Gidrogeoekologiya g. Ufy [Hydrogeoecology of Ufa city]/USC RAN. Ufa, 1993. 44 p.

Karst Bashkortostana [Karst in Bashkortostan]/Abdrak hmanov R. F., Martin V. I., Popov V. G., Rozhdestvenskiy A. P., Smirnov A. I., Travkin A. I. Ufa: Informreklama, 2002. 383 p. (In Russian).

Balkov V. A. Vodnye resursy Bashkirii [Water resources of Bashkiria]. Ufa: Bashknigoizdat, 1978. 173 p.

Vakhrushev G. V. Mineral'nye vody i gryazi Bashkirii [Mineral waters and mud of Bashkiria]. Ufa: Bashknigoizdat Publ., 1961. 156 p. (In Russian).

Gareev A. M. Reki, ozera i bolotnye kompleksy Respubliki Bashkortostan [Rivers, lakes and bog complexes of the Republic of Bashkortostan]. Ufa: Gilem, 2012. 248 p.

Grammatchikova N. M. Geomorfologiya i paleogeografiya severnoi chasti vostochnogo sklona Juzhnogo Urala i formirovanie ozernykh kotlovin Uchalinskoi gruppy [Geomorphology and paleogeography of the northern part of the eastern slope of the Southern Urals and the formation of lacustrine basins of the Uchaly group]: Avtoref. dis.…k.g.-m.n. Kazan': Kazanskii gosuniversitet, 1974. 19 p.

Kamalov V. G., Baryshnikov V. I., Opasnye geologicheskie processy na territorii Ufimskogo «poluostrova» (Inzhenernaya geodinamika) [Dangerous geological processes on the territory of the Ufa "peninsula" (Engineering geodynamics)]. Ufa: Informreklama, 2019. 240 p.

Rozhdestvenskii A. P., Zinyakhina I. K. Razvitie rel'efa Juzhnogo Urala v kajnozoe. Neogenovyj period [Development of the relief of the Southern Urals in the Cenozoic. Neogene period]. Ufa: USC RAN. 1997. 45 p.

Shkundina F. B. Monitoring ekologicheskogo sostoyaniya prirodnogo parka Kandrykul' po fitoplanktonu [Monitoring of the ecological state of the Kandrykul natural park by phytoplankton] // Vklad OOPT v ekologicheskuju ustoichivost' regiona. Mater. konf., posvyashch. 75-letiyu BGPZ (Ufa, September, 2005). Ufa, 2005. PP. 134–135.

Сведения об авторе:

Абдрахманов Рафил Фазылович, доктор геол.-минер. наук, профессор, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа, hydro@ufaras.ru

About the author:

Abdrakhmanov Rafil Fazilovich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russia, hydro@ufaras.ru

Статья поступила в редакцию 24.09.2021; одобрена после рецензирования 29.09.2021; принята к публикации 15.11.2021
The article was submitted 24.09.2021; approved after reviewing 29.09.2021; accepted for publication 15.11.2021