

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОД КАРЬЕРНЫХ озер ЮЖНОГО УРАЛА

Приведены результаты исследования новых гидроресурсов геотехнических систем – карьерных озер, сформировавшихся на территории Южного Урала после разработки колчеданных месторождений. Показано, что карьерные озера имеют общие черты с природными озерными системами: наличие выраженного термоклина, иногда оксиклина, дифференциация химического состава в вертикальном разрезе и т.д. Процессы окисления сульфидной массы оставшихся фрагментов рудных тел приводят к формированию в карьерных озерах кислой и слабокислой среды в диапазоне рН от 2,6 до 4,3. В отношении состава карьерных вод наблюдается коренное изменение и анионной, и катионной составляющей по сравнению с фоновыми водами.

Введение

В течение нескольких сотен лет в Уральской горнорудной провинции разрабатывается большое число месторождений различных полезных ископаемых. Каждое месторождение, обрабатываемое открытым способом, сопровождается изменением структуры водного баланса, преобразованием геохимического типа вод. Многие карьеры после отработки запасов затапливаются, формируя карьерные озера, являющиеся неотъемлемым структурным блоком формирующихся геотехнических систем (ГТС). Возникающие карьерные озера представляют собой новые гидроресурсы ГТС и проходят все стадии развития техногенеза [1].

В мировой литературе признано и широко используется понятие «*pit lake*» (карьерное озеро) [2-4]. В последние годы термин «карьерные озера», отражающий генезис и особенности формирования, нашел своё выражение и в отечественных публикациях [5-8]. Необходимость создания системы управ-

ления водными ресурсами ГТС определяет актуальность и практическую значимость изучения карьерных озер.

Материалы и методы исследования

Изучены карьерные озера Южного Урала, сформировавшиеся после отработки колчеданных месторождений.

Блявинское медно-колчеданное месторождение обрабатывалось открытым способом с 1952 г. в течение 19 лет. В 1971 г. после отработки балансовых запасов руд, карьерная добыча была прекращена при глубине карьера 220 м от поверхности. В период с 1973 г. по 2005 г. уровень воды в карьерном озере периодически регулировался посредством сброса части вод через систему выработок подземного рудника и сбросом неочищенных кислых рудничных вод в р. Жирикля (правый приток р. Блява).

Яман-Касинское медно-цинково-колчеданное месторождение обрабатывалось с 1988 по 1999 гг. В 2003 г. верхняя отметка уреза воды карьерного озера достигла равновесия с уровнем зеркала подземных вод, и процесс формирования колонны воды на первом этапе завершился.

Маканское медно-цинково-колчеданное месторождение обрабатывалось карьером в период с 1963 по 1981 гг. В 1982 г. верхняя отметка уреза воды карьерного озера достигла уровня зеркала подземных вод, и формирование Маканского карьерного озера было завершено.

Основной объем серноколчеданных руд месторождения Куль-Юрт-Тау обрабатывался карьером с 1979 по 1988 гг. Карьерное озеро было сформировано в 1990 г.

Отбор проб воды на карьерных озерах выполнен в период двух климатических оптимумов – ранней весной при ледоставе и в середине лета 2007 г. В участках максимальных глубин батометром Молчанова на всю глубину водной колонны в 1,5-литровые емкости из полипропилена были отобраны гидрохи-

К.А. Филиппова*, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, ФГБУН Институт минералогии Уральского отделения Российской академии наук

П.Г. Аминов, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, ФГБУН Институт минералогии Уральского отделения Российской академии наук

В.Н. Удачин, доктор геолого-минералогических наук, заместитель

*Адрес для корреспонденции: kseniya@imeny.ac.ru

мические пробы. Некоторые физико-химические параметры (рН, Eh, растворенный кислород, электропроводность, температура) фиксировались на месте отбора проб. Водородный показатель и окислительно-восстановительный потенциал определялись с помощью рН-Eh-метра «Yokogawa 8221-E» (Япония). Измерение удельной электрической проводимости выполнялось кондуктомером «HI-933000» (Португалия) с температурным компенсатором. Концентрации растворенного кислорода и температуры фиксировались через 1 м до глубины 20 м оксиметром «Hanna-9300» (Португалия). Пробы в день отбора доставлялись в лабораторию. Анализы химического состава воды были выполнены в Южно-Уральском центре коллективного пользования по анализу минерального сырья (аттестат аккредитации №РОСС RU.001.514536). Химический состав воды определялся согласно общепринятым методикам химического анализа вод суши [9]. Высокие концентрации Cu, Zn, Fe, Al определялись атомно-абсорбционным методом в режиме ацетилен – воздух (атомно-абсорбционный спектрофотометр

директора по научной работе, ФГБУН Институт минералогии Уральского отделения Российской академии наук **А.Ю. Кисин**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук

«Perkin Elmer 3110», США); К и Na в эмиссионном режиме на этом же спектрофотометре. Микроэлементы определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой («ELAN 9000», США) в лаборатории физико-химических методов исследований Института геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН (аттестат аккредитации №001544).

Результаты и их обсуждение

Карьерные озера формируются в результате смешения трещинных напорных вод, атмосферных осадков и поверхностного стока. После достижения стационарного режима в новом водном объекте возникает устойчивая вертикальная зональность, испытывающая сезонные циклы и определенную эволюцию. С момента возникновения озера между его водной массой и породами котловины происходит взаимодействие в виде сложных механических, физико-химических и биологических процессов. Первоначальный вид котловины постепенно начинает претерпевать изменения. Поскольку уступы бортов карьера устойчивы только в сухом виде, то при их затоплении начинают развиваться оползневые процессы, приводящие к сглаживанию уступов и выравниванию поверхности котловины. К механическому воздействию водной массы присоединяется химическое выветривание горных пород.

После отработки колчеданных месторождений, процессы окисления сульфидной массы оставшихся фрагментов рудных тел приводят к формированию в карьерных озерах кислой среды в диапазоне рН от 2,8 до 3,5. При глубине колонны воды на регрессивной стадии техногенеза в 40–45 м, кислой среде и высоком содержании всех макро- и микроэлементов возникает хорошо выраженная вертикальная стратификация в распределении параметров (рис. 1). Определяющим и «элементоконтролирующим» фактором является распределение кислорода по вертикали.

Три исследованных озера по величине водородного показателя относятся к категории кислых. Величина рН не поднимается выше 2,94 в карьерном оз. Яман-Касы, 2,92 – в карьерном оз. Блява и 2,57 – в оз. Куль-Юрт-Тау. Воды карьерного оз. Маканское относятся к слабокислым с рН от 4,20 до 4,31. Распределение физико-химических параметров по глубине карьерных озера наиболее

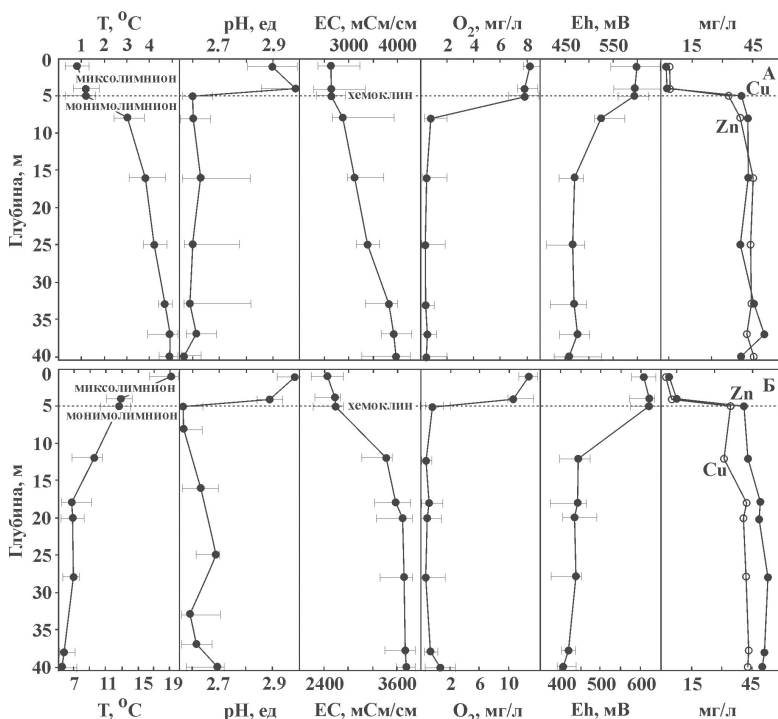


Рис. 1. Физико-химические параметры в колоннах воды карьерных озера Южного Урала и Башкортостана в зимний (А) и летний период (Б) (разбросы значений для карьерных озера Блява, Яман-Касы, Куль-Юрт-Тау, металлы на примере карьерного озера Блява).

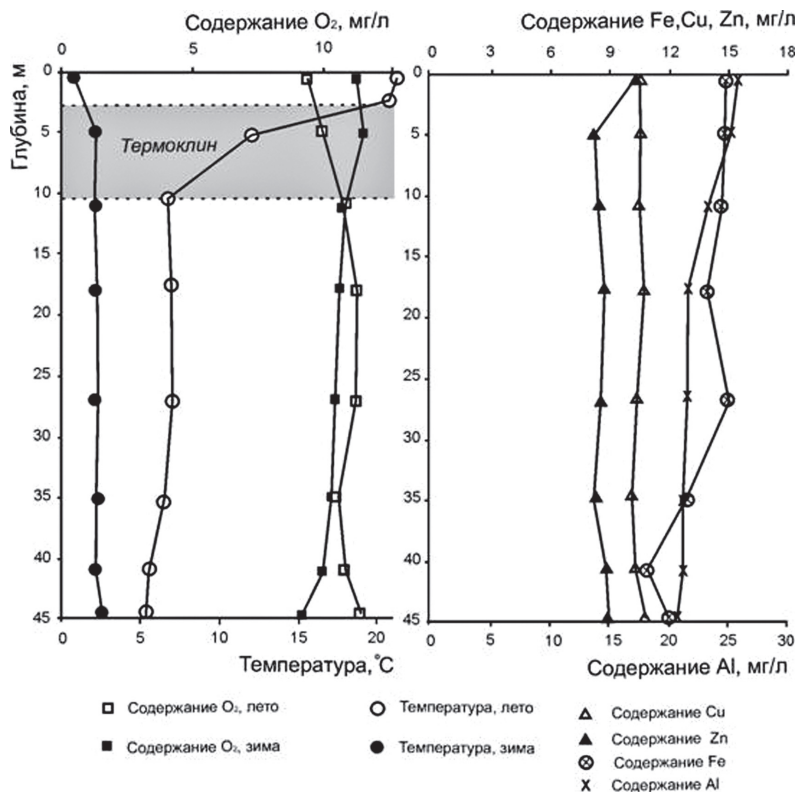


Рис. 2. Физико-химические параметры в колонне воды карьерного оз. Мокан.

контрастно проявляется при анализе температуры. Если в летний период в толще воды отмечается типичный и ярко выраженный прямой термоклин (интервал скачкообразного изменения температуры) с максимумом температуры от 18 °С до 13 °С в первых 7–8 м толщи воды, то ниже этой глубины температура в карьерном оз. Яман-Касы находится в диапазоне от 5 до 4,5 °С.

В карьерном оз. Блява на нижней границе термоклина отмечается минимальная температура 7 °С, которая с глубиной увеличивается до 8 °С на 14 м, до 9,5 °С на 26 м и остается на этом уровне до дна карьерного озера. В зимний период наблюдается обратный термоклин, но в карьерном оз. Яман-Касы он не контрастный с минимумом в 1–1,5 °С в верхних 3 м толщи воды и максимумом в 5 °С ниже глубины 17 м, а в карьерном оз. Блява зимний термоклин достаточно хорошо выражен с минимумом в 1 °С в верхних 5 м и максимумом в 7,5 °С ниже 14 м.

В летний период в толще воды карьерного оз. Куль-Юрт-Тау отмечается хорошо выраженный прямой термоклин с максимумом температуры от 19 °С до 14 °С в первых 4 м толщи воды, а ниже этой глубины температура в карьерном озере находится в пределах 5 °С. В зимний период температура подлед-

ной воды не превышает 1 °С, а ниже слабо проявленного обратного термоклина диапазон колебаний составляет от 3,5 до 4,8 °С.

В карьерном оз. Маканское летний термоклин значительно «растянут» и фиксируется летом в интервале между 3 и 10,5 м. Изменение температурного режима происходит при падении температуры от 21 °С выше термоклина до 5,5 °С ниже термоклина (рис. 2).

Содержание растворенного кислорода в толще воды карьерного оз. Яман-Касы выражается резко контрастным распределением по глубине с максимумом 10 мг/л летом и 9 мг/л зимой в верхних 3 м с резким уменьшением до 1 мг/л в оба климатических сезона на глубине 7 м. В карьерном оз. Блява такое же резкое изменение наблюдается летом: с 10 мг/л в верхних 3 м до 5 мг/л на 4 м и до 1 мг/л на 8 м. В зимний период концентрация кислорода колеблется от 12 до 13 мг/л в верхних 4 м толщи воды и к 8 м резко уменьшаются до 1 мг/л. Таким образом, в двух карьерных озерах на 3–4 м глубины отмечается четко выраженный оксиклин — область резкого уменьшения концентраций растворенного кислорода. В карьерном оз. Куль-Юрт-Тау наблюдается четко выраженный и контрастный по значениям оксиклин в диапазоне глубин с 4 по 7,5 м. Характер распределения растворенного кислорода однотипен для контрастных климатических сезонов и определяется резким падением концентраций с 7–7,5 мг/л на 4 м до 1,5–1 мг/л с 7,5 м. Распределение кислорода в водах Маканского карьерного озера равномерно возрастает от 9 мг/л в верхней части колонны воды до 11 мг/л летом и плавно понижается от 11 до 9,5 мг/л зимой. Таким образом, в этом карьерном озере, независимо от климатического периода, отсутствует оксиклин.

Сопоставление формул Курлова, отражающих химизм фоновых вод в области дренирования и вод карьерных озер, свидетельствует о глубокой трансформации химического состава вод в условиях техногенеза. В большей степени это относится к водам карьерных озер Яман-Касы, Блява и Куль-Юрт-Тау, в меньшей — Маканского. Если для фоновых вод, как правило, характерен гидрокарбонатный кальциевый тип вод, то в карьерном оз. Яман-Касы он отвечает сульфатному магниевому-алюминиевому (1), в карьерном оз. Блява — сульфатному железно-алюминиевому (2), в карьерном оз. Куль-Юрт-Тау — сульфатному железно-

В.И. Гребенщикова, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией проблем геохимического картирования и мониторинга, ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук
В.В. Дерягин, кандидат географических наук, заведующий кафедрой географии, ФГБОУ ВПО Челябинский государственный педагогический университет

кальциево-магниево-алюминиевому (3), а в карьерном оз. Маканское — сульфатному кальциево-магниево-натриево-алюминиевому (4),

$$M_{6.52} \frac{SO_4^{2-} 86.6 Cl^- 13.4}{Mg^{2+} 34.2 Al^{3+} 28.5 Ca^{2+} 21.7 Fe^{2+} 15.6} \quad (1)$$

$$M_{17.3} \frac{SO_4^{2-} 99.5 Cl^- 0.5}{Fe^{2+} 43.0 Al^{3+} 27.2 Mg^{2+} 22.4 Na^+ 7.4} \quad (2)$$

$$M_{2.81} \frac{SO_4^{2-} 98.6 Cl^- 1.3}{Fe^{2+} 44.6 Ca^{2+} 26.2 Mg^{2+} 15.8 Al^{3+} 13.4} \quad (3),$$

$$M_{3.53} \frac{SO_4^{2-} 80.9 Cl^- 19.1}{Ca^{2+} 32.8 Mg^{2+} 32.3 Na^+ 30.2 Al^{3+} 4.6} \quad (4)$$

т.е. наблюдается коренное изменение и анионной и катионной составляющей вод.

По абсолютным содержаниям доминирующими катионами в составе вод карьерного оз. Яман-Касы являются Fe, Zn, Al. Распределение этих элементов в толще воды носит закономерный характер и выражается в 5–6-кратном увеличении концентраций ниже оксиклина. Для карьерного оз. Блява типоморфными катионами являются Fe, Al, Cu, Zn. Наибольшей контрастностью в распределении концентраций по отношению к оксиклину характеризуется Fe — его содержания увеличиваются в 7 раз. Для Al, Cu, Zn характерен меньший контраст при 2–4-кратном увеличении содержаний ниже оксиклина. Максимальной степенью аномальности в водах карьерных озер Куль-Юрт-Тау и Маканское (с коэффициентом концентрации от 100 до 7000) характеризуются Cu, Cd, Mn, Sc, Co, Ni, Al, Fe, Zn, а минимальной (от 2 до 10) — As и V. Распределение содержаний химических элементов по вертикали в карьерном оз. Маканское, при отсутствии оксиклина, носит равномерный характер.

Распределение других элементов в вертикальном разрезе колонны воды карьерных озер позволяет, в первом приближении, разбить их на две условные группы: элементы, концентрации которых либо не определяются положением оксиклина, либо слабо от него зависят; элементы, концентрации которых полностью определяются положением оксиклина. К первой группе для карьерного оз. Яман-Касы следует отнести Mn, Sr, Y, Ag, Th. Во вторую группу входит большинство элементов: Li, Sc, V, Cr, Co, Ni, Ga, As, Se, Rb, Cd, In, Cs, Ba, вся группа PЗЭ, Tl, Pb, Bi, U.

В.П. Петрищев, доктор географических наук, заместитель директора по научной работе, ФГБУН Институт степи Уральского отделения Российской академии наук

Г.Ф. Лонцакова, младший научный сотрудник, ФГБУН Институт минералогии Уральского отделения Российской академии наук

Л.Г. Удачина, инженер, ФГБУН Институт минералогии Уральского отделения Российской академии наук

Для вод карьерного оз. Блява перечисленная закономерность сохраняется, за исключением Se и Bi, которые следует отнести к первой группе. Максимальной степенью аномальности (с коэффициентом концентрации от 10000 до 100000) характеризуются Cu и Cd, минимальной (от 2 до 10) — Rb.

Заключение

Несмотря на различия в условиях образования, контролируемых процессами горнопромышленного техногенеза, карьерные озера как аквальные системы техногенного происхождения имеют и общие черты с природными озерными системами: наличие выраженного термоклина, иногда оксиклина, дифференциация химического состава в вертикальном разрезе и т.д. Обобщающая схема процессов, протекающих в этих аквальных системах, изображена на рис. 3.

До глубины 5–7 м в окисленной зоне с хорошей аэрацией в любой климатический оптимум существует контрастный слой в виде миксолимниона, который объединяет эпилимнион и гиполимнион. Ниже контрастно выраженного хемоклина (граница проводится по резкому падению содержания кислорода, изменению окислительно-восстановительного потенциала, величины электропроводности и отношения Fe²⁺/Fe³⁺) расположен монимолимнион с анаэробными условиями, который не включается в процессы перемешивания водных масс в течение года. Таким образом, новые гидроресурсы уральских ГТС представлены техногенными карьерными озерами меромиктного типа.

Выполненные работы по оценке физико-химических параметров сформированных колонн воды карьерных озер позволили наметить общие особенности, свойственные этим аквальным системам техногенного происхождения: кислая реакция среды, хорошо выраженная стратифицированность по основным показателям, сезонность в распределении некоторых параметров [6, 7]. Положение оксиклина в колонне воды карьерных озер определяет и положение хемоклина — области резкого изменения концентраций химических элементов.

Изучение особенностей формирования и условий функционирования карьерных озер имеет важное значение как для познания гидрохимии техногенных систем, так и для ре-

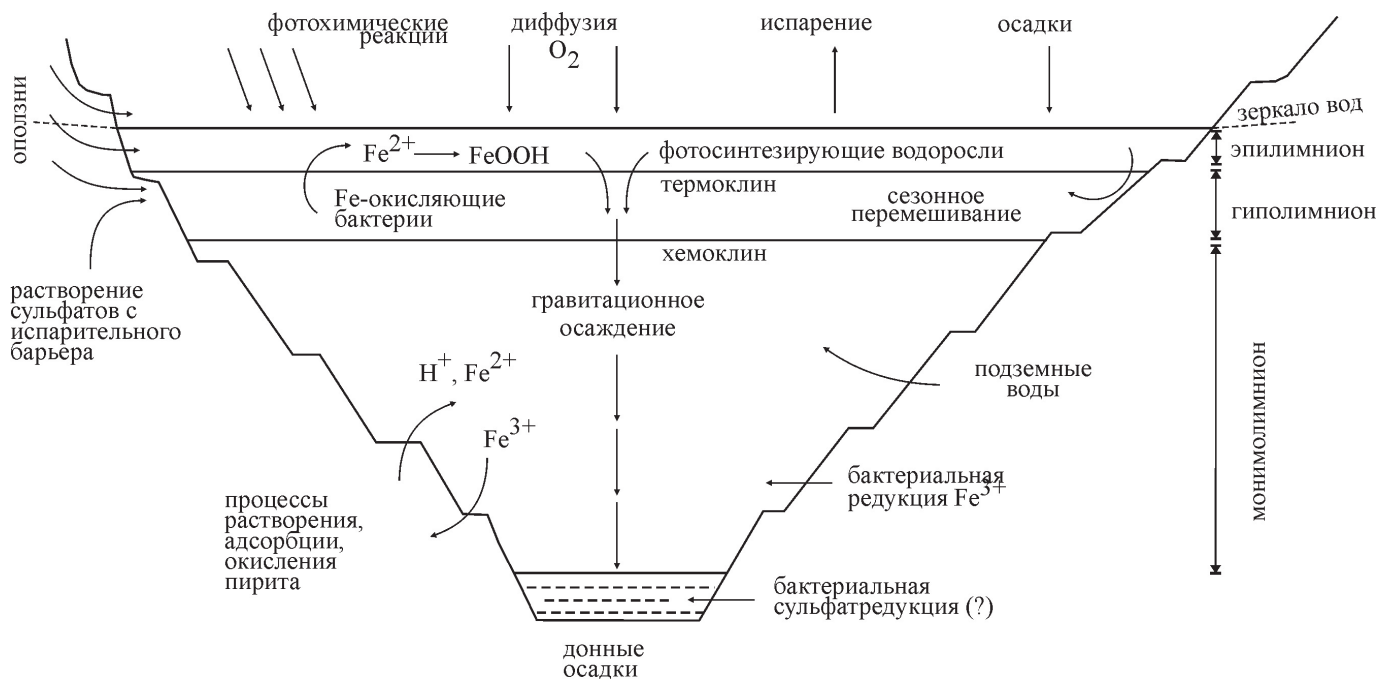


Рис. 3. Схема процессов, сопровождающих развитие меромиктных карьерных озер (суммированы данные по карьерным озерам Евразии и Северной Америки) [10-15].

ализации мероприятий по реабилитации горнопромышленных ландшафтов.

Исследования выполнены при финансовом содействии РФФИ (проект №07-05-96024-р_урал_a), интеграционного проекта УрО – СО РАН «Геохимия окружающей среды горнопромышленных ландшафтов Сибири и Урала», Министерства образования и науки РФ (проект РНП 2.1.1.8), конкурсных программ фундаментальных исследований УрО РАН №12-И-5-2060, №12-И-5-2018, №12-С-5-1037, №12-У-1004 и программы поддержки научных исследований Южно-Уральского государственного университета.

Литература

1. Емлин Э.Ф. Техногенез колчеданных месторождений Урала. Свердловск: УрГУ, 1991. 256 с.
2. Bachmann T.M. Redox and pH conditions in the water column and in the sediments of an acid mining lake / Bachmann T.M., Friese K., Zachmann D.W. // J. Geochem. Explor. 2001. V. 73. P. 75–86.
3. Castro J.M. Pit lakes: their characteristics and the potential for their remediation / Castro J.M., Moore J.N. // Environ. Geol. 2000. V. 39. № 11. P. 1254–1260.

Ключевые слова: карьерное озеро, геотехническая система, химический состав вод

4. Ramstedt M. Aqueous geochemistry in the Udden pit lake, northern Sweden / Ramstedt M., Carlsson E., Lovgren L. // Appl. Geochem. 2003. V. 18. P. 97–108.
5. Филиппова К.А. Гидрохимия карьерных озер Бакальской геотехнической системы (Южный Урал) / К.А. Филиппова, В.В. Дерягин // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 4. С. 470–476.
6. Удачин В.Н. Гидрохимия карьерных озер Южного Урала: геологическое строение месторождений и горнопромышленный техногенез / Удачин В.Н., Аминов П.Г., Дерягин В.В., Лонцакова Г.Ф. // Металлогения древних и современных океанов – 2008. Рудоносные комплексы и рудные фации. Миасс: ИМин УрО РАН, 2008. С. 324–328.
7. Удачин В.Н. Распределение физико-химических параметров в карьерных озерах Блявинского и Яман-Касинского месторождений (Южный Урал) / В.Н. Удачин, П.Г. Аминов, Г.Ф. Лонцакова, В.В. Дерягин // Вестник Оренбургского государственного университета. 2009. № 5. С. 167–172.
8. Филиппова К.А. Гидрохимия карьерного озера Центральное Бакальской геотехнической системы // Разведка и охрана недр, 2011. № 11. С. 57–60.
9. Фомин Г.С. Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам. Энциклопедический справочник. М.: «Протектор», 2000. 839 с.
10. Gammons C.H. Creating lakes from open pit mines: processes and considerations, with emphasis

on northern environments / Gammons C.H., Harris L.N., Castro J.M., Cott P.A., Hanna B.W. // Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2826. 2009. 106 p.

11. Balistrieri L. Assessing the concentration, speciation, and toxicity of dissolved metals during mixing of acid-mine drainage and ambient river water downstream of the Elizabeth Copper Mine, Vermont, USA / Balistrieri L., Seal R., Piatak N., Paul B. // Appl. Geochem. 2007. V. 22. P. 930–952.

12. Geochemistry and stable isotope composition of the Berkeley pit lake and surrounding mine waters, Butte, Montana / Pellicori D.A., Gammons C.H., Poulson S.R. // Appl. Geochem. 2005. V. 20. P. 2116–2137.

13. Espana J.S. The acidic mine pit lakes of the Iberian Pyrite Belt: An approach to their physical limnology and hydrogeochemistry / Espana J.S., Pamo E.L., Pastor E.S., Ercilla M.D // Appl. Geochem. 2008. V. 23. P. 1260–1287.

14. Удачин В.Н. Химический состав техногенных вод в карьерных озерах Башкортостана / Удачин В.Н., Аминов П.Г., Дерягин В.В. // Башкирский хим. журнал. 2008. Т.15. №4. С. 64–69.

15. Удачин В.Н. Распределение физико-химических параметров в карьерных озерах Блявинского и Яман-Касинского колчеданных месторождений (Южный Урал) / Удачин В.Н., Аминов П.Г., Лонщакова Г.Ф., Дерягин В.В. // Вестник Оренбургского ун-та. 2009. №5. С. 65–71.

K.A. Filippova, P.G. Aminov, V.N. Udachin, A.Yu. Kisin, V.I. Grebenshchikova, V.V. Deryagin, V.P. Petrishchev, G.F. Lonshchakova, L.G. Udachina

WATER CHEMICAL COMPOSITION IN PIT LAKES OF THE SOUTHERN URALS

The article represents data on research of water resources of geotechnical systems – pit lakes developed on the Southern Urals territory after pyrite mining. It was shown that pit lakes have similar features with natural lakes such as represented thermocline (oxycline in some cases), profile-differentiation of chemical composition, etc. Oxidation of sulfide ore leads to formation of acidic and weak acidic conditions with pH 2.6-4.3. Water anion and cation compositions fundamentally change in pit lakes in comparison with natural lakes.

Key words: pit lake, geotechnical system, water chemical composition