

Геолого-гидрогеологические и геохимические факторы скопления микроэлементов в хлоридных рассолах (на примере Бухаро-Каршинского артезианского бассейна)

В статье рассмотрены геолого-гидрогеологические и геохимические факторы, влияющие на скопление микроэлементов (в том числе золота) в хлоридных рассолах Бухаро-Каршинского артезианского бассейна.

Ключевые слова: Бухаро-Каршинский артезианский бассейн, формирование промышленных рассолов, факторы скопления микроэлементов.

A. S. IBRAGIMOV (SE «Institut GIDROINGEO», Uzbekistan)

Geological, hydrogeological and geochemical factors of trace elements accumulation in chloride brines: Case study of the Bukhara-Karshi artesian basin

The paper deals with geological, hydrogeological and geochemical factors affecting the trace elements (including gold) accumulation in chloride brines of the Bukhara-Karshi artesian basin.

Keywords: Bukhara-Karshi artesian basin, economic brine formation, factors of microelements accumulation.

Для цитирования: Ибрагимов А. С. Геолого-гидрогеологические и геохимические факторы скопления микроэлементов в хлоридных рассолах (на примере Бухаро-Каршинского артезианского бассейна) // Региональная геология и металлогения. — 2019. — № 80. — С. 45–49.

Бухаро-Каршинский артезианский бассейн (БКАБ) представляет собой регион наибольшего распространения промышленных вод и изучается с конца 1950-х годов. На схематическом разрезе видно, что в геологическом строении БКАБ принимают участие триасовые, юрские, меловые, палеогеновые, неогеновые и четвертичные отложения, залегающие на размытой поверхности палеозойского фундамента с угловым и стратиграфическим несогласием (рисунок).

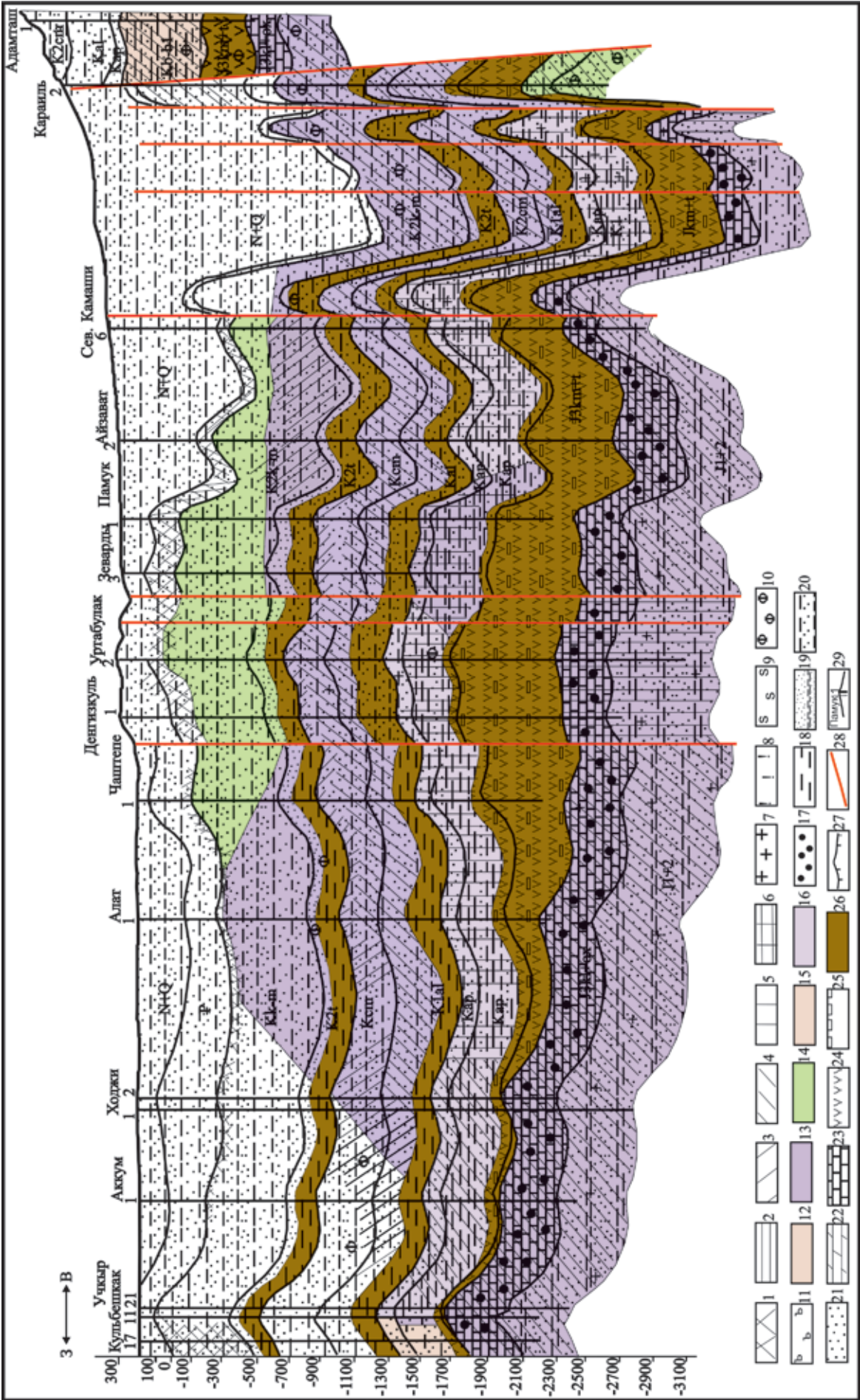
Российский академик А. В. Сидоренко еще в 70-х годах прошлого столетия отмечал: «В будущем многие минеральные рассолы, как в озерах, лагунах, так и находящиеся на больших глубинах земной коры подземные промышленные воды, станут месторождениями ценнейших химических элементов: лития, рубидия, цезия, бора, стронция, тантала, магния, брома, йода, а также золота и урана. Способы их извлечения будут настолько рентабельны, что рассолы станут такими же источниками полезных ископаемых, как и твердые минеральные концентрации».

В пределах БКАБ отложения юры, представленные всеми тремя отделами и сложенные континентальными, континентально-морскими и лагунными формациями, вскрыты повсеместно. К отложениям юры приурочены промышленные рассолы (йодобромные, литиевые,

редкометалльные и др.), которые большей частью распространены в пределах Чарджоуской и частично Бухарской ступеней.

При рассмотрении литологического состава юрских отложений снизу вверх наблюдается четкое подразделение отложений на три толщи — терригенную, карбонатную и соляно-ангидритовую. Описание литологического состава отложений юры приведены в работах П. П. Чуенко (1931), Е. А. Жукова, С. И. Ильина (1937), С. Н. Симанова (1952), Т. А. Сикстель (1955, 1960, 1964), Ю. М. Кузичкина (1958), В. Д. Ильина (1959), А. Г. Бабаева (1959, 1961, 1962, 1963), К. А. Ситириади (1961, 1964), В. И. Троицкого (1958, 1962), Д. С. Ибрагимова (1965, 1983), Т. И. Бурцева и др. (1969), А. С. Хасанова, Л. А. Калабугина, С. А. Бакиева (1975–2016) и др.

Хотя геологическое строение и литологический состав пород водоносных горизонтов БКАБ изучен подробно (изыскания проводятся в течение более 60 лет), вопросы факторов формирования промышленных рассолов остаются дискуссионными до настоящего времени. Действительно, какие факторы влияют на их формирование, наличие и/или скопление многих микрокомпонентов (включая золото) в подземных водах? В настоящее время существуют различные гипотезы, каждая из которых основана на том, какой генетический тип подземной



Геолого-гидрогеохимический разрез Бухаро-Каршинского артезианского бассейна по линии Кульбешак — Адамташ. Сост. С. А. Бакиев (2012 г.)

1–6 — минерализация подземных вод (г/л): 1 — сильно и умеренно соленые воды (2,5–7), 2 — сильно и весьма сильно соленые воды (7–15), 3 — воды, переходящие от соленых к рассолам (15–36), 4 — слабые рассолы (36–150), 5 — крепкие рассолы (150–320), 6 — весьма крепкие рассолы (320–500); 7–11 — химический состав подземных вод: 7 — хлоридные натриево-кальциевые, 8 — сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатные натриево-кальциевые, 9 — хлоридно-сульфатные натриевые, 10 — хлоридные натриевые, 11 — сульфатно-хлоридные натриевые, натриево-кальциевые магниевые; 12–17 — типы вод по содержанию йода и брома с преимущественным распределением (мг/л): 12, 13 — промысленных вод: 12 — бромные (≥ 250), 13 — йодобромные (≥ 10 , Br ≥ 200), 14–17 — вод со специфическим содержанием йода и брома: 14 — йодные (≥ 25), 15 — бромные (≥ 1), 16 — йодобромные (≥ 25), 17 — сероводородные (≥ 150). 18–29 — литолого-фациальная характеристика водоносных и водоупорных отложений: 18 — глинисто-песчаные, 19 — глинисто-песчаные, 20 — песчано-глинистые, 21 — пески, песчаники, 22 — мергель, 23 — известняк, 24 — ангидрит, гипс, 25 — каменная соль, 26 — региональные водоупоры, 27 — глубина залегания палеозойского фундамента, по данным сейсморазведки, 28 — разрывные нарушения, 29 — название структуры, нефтегазонапорная скважина и ее номер

воды (инфильтрационный, седиментационный, седиментационно-инфильтрационный или магматогенный) принят за изначальный, из которого образуются рассолы. В определенной степени сторонники каждой из точек зрения правы, так как возможность протекания в природных условиях процессов, обосновываемых указанными гипотезами, не вызывает сомнения.

Для среднеазиатских регионов наиболее распространенным и общепринятым является седиментогенный и седиментогенно-инфильтрационный тип формирования рассолов, которые могут быть приурочены к различным отложениям (терригенным, карбонатным и соленосным). Наиболее типичен разрез артезианских бассейнов, где можно проследить определенную последовательность в накоплении отложений: в низах залегают терригенные образования, на них — согласно — карбонатные, затем галогенная толща солей, выше — глинистые отложения. Такой осадочный цикл характерен для многих рассолоносных гидрогеологических структур (Припятский прогиб, Днепровско-Донецкая, Прикаспийская, Восточно-Кубанская, Амударьинская впадины, Иркутский амфитеатр и др.). В возрастном отношении он может соответствовать той или иной части геолого-стратиграфического разреза, но от этого последовательность отложений не меняется, что указано в работах М. С. Швецова, Н. М. Страхова, В. Д. Наливкина, Л. В. Пустовалова, В. Е. Хаина, В. Белоусова и др.

Анализ предыдущих исследований позволил сделать следующий вывод. Во всех рассолоносных гидрогеологических регионах Узбекистана и сопредельных территорий продолжительное время (мезозой — палеоген) существовали благоприятные условия для формирования и сохранения различного состава и минерализации подземных вод. Инфильтрация в эти периоды была сравнительно кратковременной и малоэффективной в своем влиянии на все более погружающиеся водоносные горизонты. Многочисленные глинистые пласты (достаточно мощные и регионально выдержанные), нисходящие вертикальные движения способствовали увеличению пластовых давлений и температур с глубиной и преобразованию химического состава и минерализации подземных вод, отжиму поровых растворов, сохранению элизионного режима водообмена в разрезе мезозойских отложений. В этих условиях вполне правомерны всевозможные гидрогеохимические процессы на стадиях седиментогенеза, катагенеза и эпигенеза.

В гидрогеологическом отношении БКАБ относится к восточной части сложного Амударьинского артезианского бассейна и выделен как бассейн второго порядка (Б. А. Бедер, 1958; Б. Б. Митгарц, Н. И. Толстихин, 1961). В структурном отношении — это область прогиба, сложенная осадками мезозой-кайнозой, которые несогласно залегают на доюрском фундаменте.

Геолого-тектоническое строение бассейна благоприятствует образованию и сохранению в отложениях мезозоя высокоминерализованных напорных вод, содержащих повышенные концентрации редких, щелочных и других элементов. История изучения подземных вод мезозойских отложений БКАБ демонстрирует, что существуют различные точки зрения об областях питания и создания напоров юрского и нижнемелового водоносных комплексов и до сих пор по этому вопросу нет единого мнения.

Одна группа исследователей считает, что гидрогеологические условия изучаемых водоносных комплексов определяются влиянием инфильтрационных вод, так как основной областью питания и создания напоров являются юго-западные отроги Гиссарского и Заравшанского хребтов. Увеличение общей минерализации вод и падение пьезометрического напора, а также основное направление потока подземных вод — с юго-востока на северо-запад и запад — послужили основаниями для такого вывода.

Другая группа, основываясь на гидродинамической связи между юрскими и нижнемеловыми водоносными комплексами, проявляющейся в местах отсутствия между ними водоупора, т. е. в зонах тектонических нарушений, предполагает, что гидродинамический режим этих водоносных комплексов формируется под влиянием элизионных процессов. Участки перетока вод из юрского в нижнемеловой комплекс фиксируются как зоны пьезоминимумов для юрского и нижнемелового водоносных комплексов.

С гидрогеологическими и гидрогеохимическими зонами хорошо согласуются гидродинамические зоны напряженности, выделенные и описанные для территории Амударьинского бассейна профессором А. С. Хасановым

(1972, 1976). Доказав связь генетических зон напряженности с редкими элементами, он сделал вывод, что «подземные воды с повышенными содержаниями йода, брома, стронция, рубидия, цезия, селена, теллура, индия, скандия и галлия приурочены в основном к зонам В (геостатического генезиса), Г (геодинамического) и Д (аномального генезиса напряженности) в пределах глубоких структур». За критерий выделения гидродинамических зон принята напряженность водонапорной системы, под которой понимается ее потенциальная энергия, возникающая в результате воздействия внешних и внутренних сил. Это позволило А. С. Хасанову выделить пять основных зон генезиса: гравитационного (А), гидростатического (Б), геостатического (В), геодинамического (неотектонического) (Г) и аномального (Д), каждая из которых характеризуется различными типами подземных вод. В зоне А получили развитие гидрокарбонатные воды атмосферного происхождения с минерализацией до 3 г/л; в зоне Б — преимущественно сульфатные смешанного типа с минерализацией от 3 до 35 г/л; в зонах В, Г и Д — хлоридные с минерализацией более 35 г/л.

Описанный принцип выделения гидродинамических зон напряженности использован при районировании промышленных вод.

Анализируя существующие положения, а также гидродинамические и гидрогеохимические условия юрского и верхнемелового водоносных комплексов БКАБ, можно предположить, что воды рассматриваемых комплексов являются в основном седиментационными при элизионном режиме водообмена.

В гидрогеологическом разрезе БКАБ выделяются несколько водоносных комплексов. Это ниже- и среднеюрский, верхнеюрский, неоком-аптский и альб-сеноманский. Водоносные комплексы отделены друг от друга регионально выдержанными водоупорами: батнижнекелловейский, кимеридж-титонский, нижнеальбский и нижнетуронский водоупоры. Они сложенные мощной (150 до 743 м) соляно-ангидритовой толщей, глинами с редкими прослоями алевролитов и песчаников (мощностью от 50–70 до 100 м).

Рассолы юрского водоносного комплекса находятся в условиях застойного режима с весьма медленным перемещением (В. А. Кудряков, 1960; Б. А. Бедер, 1961; Я. А. Ходжакулиев, 1966; А. С. Хасанов, 1972; Л. А. Калабугин, 1976 и др.), о чем свидетельствуют расчеты, выполненные В. А. Кудряковым и Н. А. Филипповским. По данным первого — скорость движения воды равна 1 мм/год, а по данным второго — 8 см/год (Северный Уртабулак) [1].

В химическом составе подземных вод юрских отложений, приуроченных к нефтяным, газоконденсатным и газовым месторождениям Чарджоуской ступени, выявлена зависимость увеличения микроэлементов с ростом общего органического углерода ($C_{орг}$).

По мнению некоторых исследователей (Ю. А. Богданов и др., 1986; Д. С. Ибрагимов, С. А. Бакиев, 1990), совместное увеличение минерализации и содержания микроэлементов рассолов в подсолённой толще происходит за счет поступления более крепких рассолов из недр Земли, а надсолённой — рассолов из толщи юры и межсолевых линз.

Вертикальная миграция флюидов, отраженная в вертикальной гидрохимической зональности при отсутствии значительного горизонтального перемещения рассолов, позволяет предположить, что Амударьинский артезианский бассейн — широко открытая книзу водонапорная система с тесной связью всех глубоких и аномальных гидрохимических зон через тектонически ослабленные каналы и зоны растяжения с глубинными источниками, в том числе с подкоровыми явлениями и верхней мантией (М. Г. Гаврилюк, Д. С. Ибрагимов, 1983). Не отжим поровых растворов при диагенезе и не эвапоритовые процессы в позднеюрское время, а неотектоника и связанная с ней вертикальная миграция флюидов из локальных очагов — основной решающий фактор формирования солей и рассолов и связанных с ними высоких концентраций промышленно ценных микрокомпонентов в изучаемом регионе.

О. Е. Звягинцев в монографии «Геохимия золота» (М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1941, 114 с.) отмечал: «На металлическое золото действуют следующие реагенты: хлор, бром, йод, царская водка, кислоты в присутствии окислителей и т. д.». Таким образом, можно с уверенностью констатировать, что подземные воды, содержащие бром и йод, однозначно участвуют в скоплении микроэлементов (в частности золота) в подземных водах. В химическом составе подземных вод Бухарской и Чарджоуской ступеней часто упоминается наличие высоких концентраций йода (20–30 до 70–100 мг/л) и брома (от 250 до 580 мг/л). Кроме температуры, давления и присутствия органических веществ, они также относятся к геохимическим факторам, способствующим скоплению золота в подземных промышленных водах, так как йод и бром, будучи сильными окислителями, обладают высокими окислительно-восстановительными потенциалами, способствующими выщелачиванию золота из пород водоносного горизонта и нефтяных залежей.

Из литературы, посвященной вопросам геотехнологии, известно, что йод-йодидные растворы способны извлекать золото в концентрациях, близких к традиционно используемым в цианистой технологии. Возможность элементов-галогенидов растворять золото объясняется их способностью к комплексообразованию. Казахстанскими учеными установлено, что йод (как и бром) обладает способностью к образованию анионов с высокой степенью поляризации — так называемых полигалогенидных соединений I^{3-} , I^{5-} , которые являются активным началом для процесса интенсификации и полноты выщелачивания золота из минерального сырья [2; 3].

Известно эффективное использование йода в мировой практике: например, для йодидного рафинирования циркония и титана, выщелачивания редкоземельных элементов и др. Также известен опыт использования йода для кучного выщелачивания золота, в том числе с предварительной ультразвуковой обработкой растворителя. Из приведенных примеров и предпосылок отметим, что йод-йодидные и бром-бромидные растворы обладают высоким потенциалом +536 и 1087 мВ соответственно, что способствует дополнительному выщелачиванию микроэлементов из пород.

Изложенные факторы и краткий анализ (геолого-тектонический, гидродинамический и гидрогеохимический) условий формирования и распространения подземных промышленных вод Узбекистана, содержащих золото, позволяют констатировать следующее:

1) Формирование водоносных горизонтов и водосодержащих пород Бухаро-Каршинского артезианского бассейна происходило в различных фациальных условиях — континентальных, морских, лагунных, которые оказали основное влияние на формирование химического состава вод.

2) Высокоминерализованные воды (рассолы) приурочены к образованиям юры и нижнего мела.

3) Повышенные концентрации золота (менее 1,0 мкг/л) в подземных водах отличаются, как правило, региональным распространением. Наиболее высокие концентрации золота отмечены на эксплуатируемых нефтегазовых месторождениях Умид, Крук и приурочены к межструктурным зонам глубоких синклинальных прогибов, так как в них создается наиболее благоприятная геохимическая обстановка для формирования подземных йодо-бромных вод, которые, обладая довольно высоким потенциалом (E_h йодобромных вод колеблется от 640 до 980 мВ), в свою очередь оказывают существенное влияние на выщелачивание золота из пород отложений юры и мела.

4) Немаловажную роль в скоплении золота в подземных водах играет наличие водно-растворенных органических (ВРОВ), с которыми золото образует так называемое органогенное золото.

5) Наличие в промышленных подземных водах высоких концентраций микроэлементов (и в частности золота) связано с поступлением по глубинным разломам высококонцентрированных, термальных флюидов во время активизации тектонических процессов (юрский и неоген-четвертичные периоды).

6) На формирование и сохранение высоких концентраций микроэлементов и золота в подземных промышленных водах верхнеюрского водоносного комплекса (J_3XV -ПР, J_3XV -Р, J_3XV -НР горизонты) влияло наличие в геологическом разрезе БКАБ мощной соленосной толщи (J_3km -tit), играющей роль водоупора.

1. Бакиев С. А. Промышленные воды Узбекистана и перспективы их использования. — Ташкент: ГП «Институт ГИДРОИНГЕО», 2012. — 140 с.

2. Байконурова А. О. Выбор нетоксичных растворителей для выщелачивания золота из золотосодержащего сырья / А. О. Байконурова, С. С. Конаратбекова, Р. Т. Дүсіп, Ж. Куантай // Промышленность Казахстана. — 2014. — № 1 (82). — С. 90–92.

3. Бетехтин А. Г. Гидротермальные растворы, их природа и процессы рудообразования // Основные проблемы в учении о магмотогенных рудных месторождениях. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — С. 125–279.

1. Bakiev S. A. Promyshlennyye vody Uzbekistana i perspektivy ikh ispol'zovaniya [Industrial waters of Uzbekistan and prospects for their use]. Tashkent: GP «Institut GIDROINGEO». 2012. 140 p.

2. Baykonurova A. O., Konyratbekova S. S., Dysip R. T., Kuantay Zh. Vybora netoksichnykh rastvoriteley dlya vyshchelachivaniya zolota iz zolotosoderzhashchego syr'ya. *Promyshlennost' Kazakhstana*. 2014. No. 1 (82), pp. 90–92. (In Russian).

3. Betekhtin A. G. Hydrothermal solutions, their nature and processes of ore formation. *The main problems in the study of magmatogenic ore deposits*. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. 1955. Pp. 125–279. (In Russian).

Ибрагимов Азиз Сабирович — зав. лабораторией. Институт гидрогеологии и инженерной геологии (ГП «Институт ГИДРОИНГЕО»). Ул. Олимлар, 64, Ташкент, 700041, Узбекистан.

Ibragimov Aziz Sabirovich — Head of Laboratory. Institute of Hydrogeology and Engineering Geology (SE «Institute GIDROINGEO»). 64 Ul. Olimlar, Tashkent, 700041, Uzbekistan.