

К ВОПРОСУ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДОМ ПВ ИЗ СЛАБООБВОДНЁННЫХ, СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ И КАРБОНАТНЫХ РУД

Суграли кони 3-сонли уюми тажриба учаскасида ер остидан уран қазиб олиш бўйича олдин ўтказилган тажрибалар ва миқдорий изланишлар натижалари келтирилган. Лой қатламлари билан алевритлардан, ўтказувчанлиги паст, турғун зоналардан ҳамда ўта қорбанатли рудалардан уран ажратиш олиш бўйича тажрибавий изланишларининг натижалари таҳлил қилинмоқда.

Таянч иборалар: ер остидан уран қазиб олиш, пластнинг гидроёрилиши, оқимнинг юналишини ўзгартириш, математик моделлаштириш, геодинамика, геокимё.

The results of previously conducted experimental and numerical studies on the underground leaching of uranium at the experimental sites of deposit No. 3 of the Sugrali deposit are presented. The results of experimental studies on the leaching of uranium from high-carbonate, with interlayers of clays and silts, low-permeable ores, as well as from stagnant zones are analyzed.

Key words: underground leaching of uranium, hydraulic fracturing, flow reversal, mathematical modeling, geodynamics.

Усманов Р.И.
руководитель группы
инновационного центра
НГМК



Метод подземного выщелачивания (ПВ) позволяет добывать полезные ископаемые из глубоких рудных тел путём их избирательного растворения на месте залегания и последующего извлечения на поверхность Земли в виде химических соединений, образованных в зоне реакции.

Рудное тело вскрывается под системой скважин, располагаемых в плане рядами, многоугольниками, кольцами. В скважины подают реагент, который, фильтруясь по пласту, выщелачивает (переводит в продуктивный раствор) полезные компоненты. Продуктивный раствор, насыщенный соединениями полезного компонента, через систему технологических скважин, объединённых в технологические ячейки и блоки, откачивается на поверхность для дальнейшей переработки. Далее, в процессе переработки, из продуктивного раствора производится комплексное извлечение металлов, а оставшиеся маточные растворы до укрепляются выщелачивающим реагентом, и снова подаются в нагнетательные скважины, в качестве рабочего раствора. Затем, стекая вниз, растворяет полезное ископаемое и процесс повторяется.

Обычно в эксплуатацию метода ПВ вовлекаются экзогенные месторождения, рудное тело в которых находится в хорошо проницаемом, обводнённом, песчаном продуктивном горизонте.

Добыча полезных ископаемых методом ПВ из слабо обводнённых (или сухих) горизонтов, рудные тела которых, локализованы в слабопроницаемых, известковистых, высококарбонатных и заглинизированных песчаниках, не достаточно изучена и представляет определённый интерес.

Пользуясь, предоставленной возможностью опубликования статьи, автор, считает необходимым, предоставить некоторые результаты и выводы, проведённых исследований с 1980 по 1994 годы по добыче урана из упорных слабообводнённых (сухих), высококарбонатных, с прослоями глин и алевритов, слабопроницаемых участков ПВ залежи № 3 месторождения «Суграла» бывшего Восточного рудоуправления НГМК.

Характеристика объекта исследования

Сугралинское рудное поле расположено в краевой части Бешбулакской впадины, примыкающей к Тамдынскому горсту. Чарыктинский разлом северо-западного простирания, проходящий по центру рудного поля, главная роль принадлежит блочной тектонике. Смещение блоков по верхней амплитуде достигает от 10 до 150 метров.

Геологические образования подразделяются на два чётких структурных этажа: палеозойский, образующий фундамент, сложенный консолидированными осадочно-вулканогенными и интрузивными породами нижнего и верхнего палеозоя, и мезокайнозойского (покров), представленный слабометаморфизованными осадочными породами верхнего мела, палеогена, неогена и антропогена.

Мощность отложений мезозоя и кайнозоя увеличивается в направлении от Тамдытау к центру Бешбулакской впадины. Максимальная мощность имеет место в Джаманкумском прогибе (примерно 1000м), который на востоке граничит с Тамдынским горстом.

Оруденение Сугралинского рудного поля относится к инфильтрационному типу и локализуется в водоносных горизонтах верхнего мела.

На западе залежи рудовмещающим является маастрихтский и Сугралинский горизонты. На востоке залежи рудовмещающим является маастрихтский горизонт.

Гидрогеологические условия

В гидрогеологическом отношении площадь Сугралинского рудного поля расположена на юго-восточном крыле крупного артезианского бассейна. В обводнение разреза участвует: горизонт грунтовых вод в верхнем палеогене – антропогене и 5 горизонтов напорных вод: 1-сарбатырский, 2-лявланский, 3-рудовмещающий, 4-сеноманский, 5-палеозойский.

Горы Тамдытау являются местной областью питания водоносных горизонтов, создающей гидростатические напоры в горизонтах межпластовых вод. Движение подземных вод происходит от гор Тамдытау в северо-западном направлении, в сторону общего погружения палеозойского фундамента и падения пластов покрова.

Залежь № 3 расположена в сводовой части Сугралинской антиклинали и поэтому: 1 - сарбатырский горизонт выступает выше уровня подземных вод и является сухим; 2 - отложения лявланского водоносного горизонта в районе залежи № 3 отсутствуют; 3 – сеноманский водоносный горизонт гидравлически связан с палеозойским водоносным горизонтом, образует вместе с ним водоносный комплекс.

Водообильность и водопроницаемость комплекса крайне неравномерная. Удельные дебиты изменяются от 0,005 до 3-4м³/сут. На большей части рудного поля представлен существенно водоупорными породами.

Рудовмещающий водоносный горизонт

Рудовмещающий водоносный горизонт является сложнопостроенным и делится на два водоносных подгоризонта: маастрихтский и сугралинский. Верхний маастрихтский подгоризонт имеет распространение на площади рудного поля, нижний – сугралинский подгоризонт развит в пределах западной части рудного поля и выклинивание идёт к центральной части.

Литолическое строение маастрихта: в верхней части разреза залегают мелкозернистые, реже тонкозернистые пески, которые сменяются известковистыми песками с прослоями песчаников на известковистом цементе, нижняя часть разреза сложена, почти, исключительно известковистыми песчаниками.

Мощность отложений в зависимости от структурных условий колеблется от 6 до 18 метров.

Сугралинский водоносный подгоризонт имеет сложное литологическое строение.

Преобладающими в разрезе являются мелкозернистые, реже среднезернистые пески мощностью 10-25м с прослоями глин и алевроитов. В основании разреза обычно залегают песчаники на известковистом цементе. В кровле горизонта залегают влагоёмкие, практически безводные глинистые песчаники нижнего зоцена мощностью 1-5м, выше которых распространяются выдержанные по мощности и площади (30-40) мергели и мергелистые глины Кендык-Тюбинского и джейрантурского горизонтов нижнего турона мощностью 30-35м. Глубина залегания кровли зависит от геолого-структурных условий площади. В пределах залежей № 2 и № 3 глубина залегания кровли составляет 200-420м и увеличивается к юго-западу. Пьезометрические уровни в пределах западной группы залежей (№ 2 и № 3) залегают на глубине 130-170м.

Напор на кровлю горизонта составляет от 70 до 330м. Проницаемость рудовмещающего горизонта является слабой. Проводимость также невысокая. По степени водообильности Сугралинский подгоризонт резко отличается от маастрихтского. Коэффициент фильтрации маастрихта почти в два раза ниже, чем у сугралинского подгоризонта. Большое значение имеет степень карбонатности и глинистости песчаных отложений маастрихта. Водообильность и водопроницаемость отложений рудовмещающего горизонта характеризуется неравномерностью в вертикальном разрезе и по площади.

В статистических условиях, до начала водопонижительных работ, уровни подземных вод находились в отметках 146-147м, а естественное направление потока было западным и Северо-Западным, с расчётной скоростью 8-12м в год.

Затем, в результате многолетнего шахтного водоотлива, поток подземных вод изменил своё направление на северо-восточное и пьезометрические уровни на залежи № 3 значительно понизились до 180-182м.

Морфология рудного тела.

Залежь представляет собой рудный ролл с мощной мешковой частью и сравнительно маломощными крыльями, который локализуется в породах сугралинского горизонта. В структурном отношении, залежь приурочена к своду сугралинской антиклинали. В плане залежь представляет непрерывную полосу забалансовых руд, вытянутую в направлении с С-СВ на Ю-ЮЗ. Рудное поле имеет несколько плавных изгибов, следующих границе выклинивания окисленных

пород. Вся залежь характеризуется низкими содержаниями полезного компонента, равномерно распределённого во всех морфологических элементах, причём относительно высокие содержания отмечаются в виде узких полос, вытянутых вдоль границ зоны пластового окисления (ЗПО). Средние мощности рудного тела: мешковая часть – 3,39м, верхнее крыло – 1,31м, нижнее крыло – 1,52м. На юге залежи верхнего крыла практически целиком залегают в подошве маастрихтского подгоризонта в крепких песчаниках, а нижнее крыло практически не развито.

Вещественный состав рудовмещающего горизонта.

Руды залежи № 3 сложены главным образом песками и известковистыми песчаниками маастрихта и сугралинского горизонтов. Песчаные разности представлены мелко и тонкодисперсными обломочными и аутогенными минералами. Содержание тонкого глинистого минерала в рудах составляет от 15 до 26,2%, а в нижнем крыле имеются линзы и обрывки глин. Тонкий глинистый материал является цементирующей массой песчаных пород. В карбонатных разностях главную роль цементации играет кальций.

Рудные минералы представлены урановыми чернями, преимущественно в тонкозернистых песках с мелкими включениями окатышей глин. Черни обволакивают песчаные и алевроитистые частицы. Текстура песков косослоистая.

На севере залежи, карбонатность руды характеризуется низкой (до 0,7%), на юге, особенно, в верхнем крыле – среднее содержание карбонатов (до 5%) (см. рис. №1). По составу руда преимущественно алюмосиликатная.

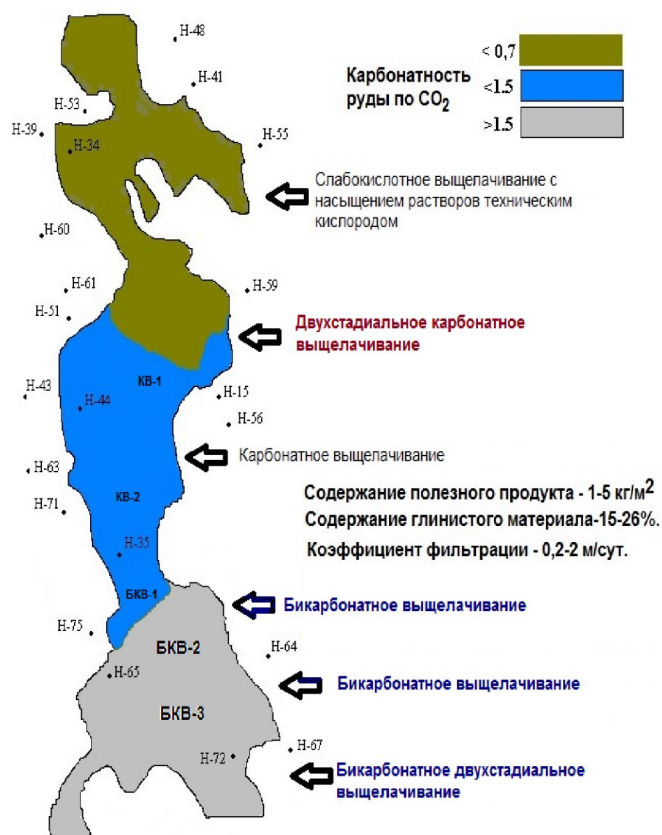


Рис. 1. Карбонатность рудного поля на залежи № 3

Гидрогеологические характеристики рудовмещающего горизонта

Таблица 1

Гидрогеологические параметры	Маастрихтский подгоризонт	Сугралинский подгоризонт
Удельные дебиты, л/с	0,022-0,127	0,045-0,16
Коэффициент фильтрации, м/сут	0,21-1,1	1,2-3,2
Проводимость, м²/сут	5,2-16,8	18,5-19,1
Коэффициент пьезопроводности, м²/сут	1-4,10	3-5,10

Химический состав руд

Таблица 2

Содержание компонент, %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	S _{общ}	P ₂ O ₅
minimum	65,9	3,57	0,74	0,19	0,7	0,28	0,03	0,005
maximum	80	8,88	2,38	0,92	4,47	0,88	2,72	0,54
среднее	74,2	6,436	1,42	0,6	1,37	0,54	0,72	0,125

Геотехнологические условия разработки залежи способом ПВ.

Начиная, с 1979 года начались опытно-эксплуатационные работы по отработке залежи №3 методами кислотного, карбонатного, бикарбонатного выщелачивания.

Соединения шестивалентного урана (U^{6+}) легко переходят в рабочие растворы, а растворение соединений 4 валентного урана (U^{4+}) затруднено. Ускорение этого процесса достигается повышением окислительно-восстановительного потенциала E_h рабочих растворов, в связи, с чем приобретают значение потенциалобразующие компоненты минерализации воды, среди которых главными являются кислород и трёхвалентное железо. Его растворимость в воде достигает до 10 мг/л . Повышая E_h воды, кислород способствует переводу (U^{4+}) в (U^{6+}). Кислотность среды инициировалось подачей кислорода или перекиси водорода. Основными компонентами минерализации воды являются HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ .

В центре залежи, и развиваясь дальше к северу, отмечается высокая продуктивность и низкая карбонатность руд, выдержанная мощность мешковой части ролла.

Ввиду низких пьезометрических уровней (порядка 180-182м, в относительных отметках) на залежи был затруднён подъём технологических растворов. Для откачки использовались дорогие и не совершенные погружные насосы в коррозионнотстойном исполнении, вместо обычного применявшего насоса эрлифтного раствор подъёма. Кроме того, низкие уровни подземных вод затрудняли освоение технологических скважин и различные работы по восстановлению их продуктивности (прокачки, кислотные обработки и т.п.).

Гидродинамический режим залежи за время эксплуатации искусственно изменялся. Соблюдать правило способа ПВ – баланс отка-

ченных и закаченных растворов – не представлялось возможным ввиду низких уровней подземных вод. Количество закаченных растворов всегда превышало количество откаченных, поэтому на площади залежи начали постепенно формироваться в купол депрессии. Закачка велась с дисбалансом в сторону увеличения, что позволило повысить уровни на 10-15м, а затем в 1986 году с вводом в эксплуатацию заводнения посредством гидроразрыва продуктивного пласта – до 135-136м. (см. рис.2). В период интенсивной эксплуатации полигона, на отработываемой площади явно выделились 3 депрессионные купола: на севере, в центральной части и на юге, с абсолютными отметками на глубине 129—131м. В левом контуре залежи №3, в районе наблюдательных скважин №44 и № 51 образовалась депрессионная воронка, из-за интенсивной откачки (см. левый контур опытных блоков БКВ-1 и БКВ-2).

Повышению уровней способствовало освоение технологических реверсивных скважин (эрлифтный раствороподъём), проводить ремонтные работы и осуществлять технологическую откачку продуктивных растворов. Чтобы освоить залежи от центра к югу потребовалось внести изменения технологии отработки.

К югу, залежи резко меняются характеристики геологических и гидрогеологических руд и рудовмещающих пород. В освоении залежи от центра к югу потребовалось изыскать нетрадиционные методы отработки. Резко увеличивается степень карбонатности руды с севера на юг от 0,7% до 5%, состоящие в основном из кальцита, арагонита, доломита, магнезита, сидерита, анкерита, родохрозита, витерита и др.

Также, изменяется и морфология рудного тела, почти исчезает нижнее крыло, а верхнее крыло залегаёт в крепких песчаниках, неподдающихся инфльтрационному выщелачиванию.

На ранней стадии опытных испытаний для выщелачивания урана использовались растворы с содержанием карбонат (5 г/л) и бикарбонат калия (4 г/л), серной кислоты (5 г/л), что не вызывало набухания глин. Степень извлечения урана составил 79%, отношение Ж:Т=4. Однако высокая стоимость карбонат - бикарбонат калия ограничило его использование.

В связи с этим, а также из-за высоких удельных затрат серной кислоты на юге залежи в опытном порядке отработывались две схемы ПВ: карбонатная (содовая) с использованием окислителей (технический кислород или перекись водорода) и бикарбонатная с инициированием бикарбонат - иона в пласте.

Карбонатный метод ПВ в опытных условиях показал очень хорошие результаты. В основу карбонатного выщелачивания урана лежит реакция:



Большому расходу реагентов способствуют гипс и сульфат магния:



В широких масштабах, без решения проблем водоочистки, умягчения растворов и методов подачи окислителей в пласт, его использование не целесообразно. Активизируются в пласте кольматационные химические процессы и образуются так называемые «застойные зоны» (рис.3). Одним из действенных способов, позволяющих предотвратить кольматационные процессы, является реверсирование фильтрационного потока.

Опытные работы по подготовке рудного блока принудительным окислением с использованием технического кислорода, а также подачей сжатого воздуха, насыщенного кислородом и выщелачивающим раствором, позволили отработать в промышленных масштабах две технологии: бикарбонатно-кислотной и мини - реагентной.

Бикарбонатный способ ПВ, с инициированием бикарбонат иона, в пласте также не рентабелен без окислителей. Использование технического кислорода или перекись водорода в качестве окислителей, и имея, достаточное содержание карбонатов в пласте получаются

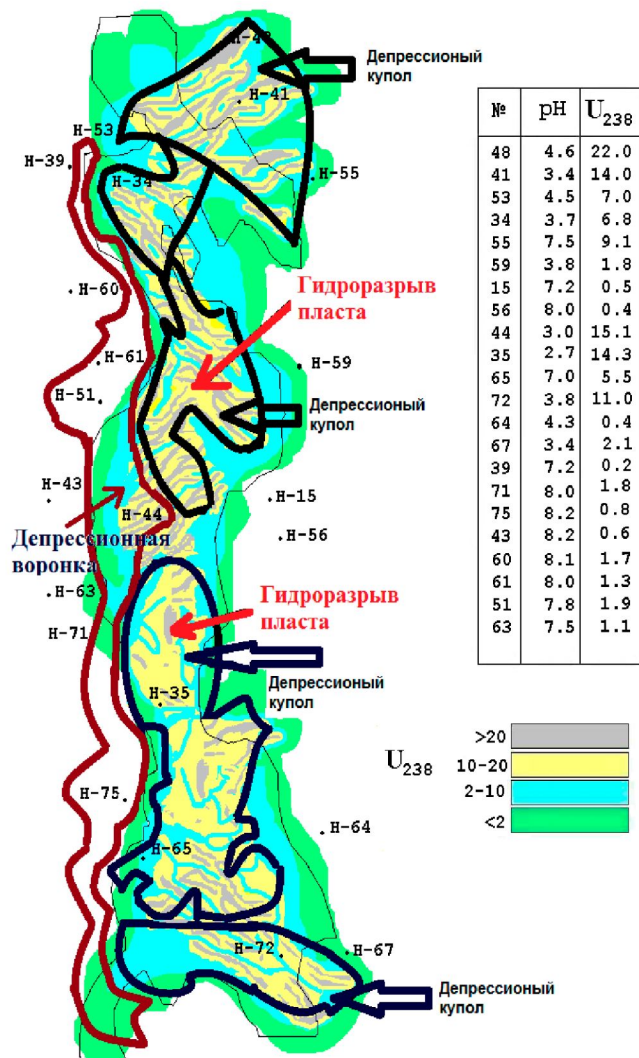


Рис. 2. Гидродинамическая обстановка на залежи №3 на 01.12.1986 года

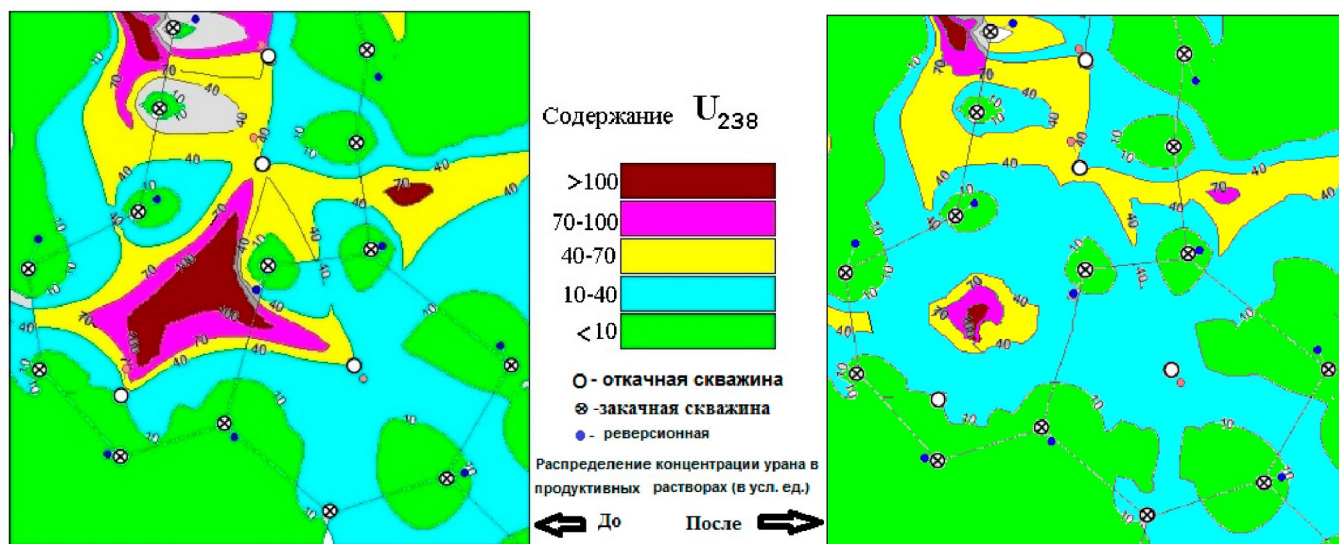


Рис. 3. Образование застойных зон в пласте

неплохие технологические показатели выщелачивания. Этот метод можно использовать, когда содержание карбонатов в руде достаточно велико. Бикарбонатно-кислотное выщелачивание применяется при содержании CO_2 в рудовмещающих отложениях более 2%. Технология основана на переходе карбонатов – иона при подкислении рабочих растворов до значений $pH=2-3$ и насыщении кислородом.

Миниреагентная технология схема выщелачивания применяется при содержании CO_2 в рудах от 0,5 до 2% и напорном режиме пластовых вод в контурах объекта отработки.

По результатам опытных исследований была предложена двухстадиальная схема выщелачивания, которая объединила положительные черты – карбонатной и кислотной. На первом этапе в пласт подается окислитель (технический кислород) и минимальное количество кислоты для иницирования бикарбонат – иона.

По мере расходования карбонатов в пласте и падения концентрации ионов (HCO_3^-) в откачных растворах, в пласт начинают подавать, вместе с окислителем, серную кислоту.



Этот метод даёт значительную экономию расходов серной кислоты, сокращения сроков отработки и приемлемые темпы извлечения компонента.

Предварительное окисление рудной минерализации путём нагнетания сжатого воздуха и отжатия пластовых вод из объёма эксплуатационного блока ($pH=3.5-4$, добавочная кислотность 0,15-0,35 г/л, насыщенность кислородом воздуха 50-80 мг/л). По мере работы откаченных скважин происходит постепенное снижение содержания урана (до 50-80 мг/л), так и бикарбонат иона (до 360-450 мг/л).

Продуктивные растворы характеризуются слабощелочной реакцией ($pH=7.6-8$) и незначительным (20%) повышением минерализации пластовых вод. Техногенные изменения рудовмещающих песков визуально фиксируются по смене их окраски – с серой на белосерую окраску с мелкими (до 10 мм) бледно жёлтыми пятнами. Минерализованный состав песков (средневзвешенный на мощность блока) изменяется незначительно, уменьшается количество карбонатных минералов (кальцит, доломит, сидерит) с 1,9 до 1,4%, глинистых составляющих (монтмориллонит, гидрослюда, каолин) с 4,5 до 3,5%. Из новообразований следует отметить плёнки гипса и гидроксидов железа (псевдоморфозы по пириту, марказиту).

Результаты спектральных анализов рудовмещающих отложений свидетельствуют о незначительном выщелачивании таких элементов как Fe, Al, Ca, Mg, Na и K. Этот метод даёт значительную экономию расходов серной кислоты, сокращению сроков отработки и приемлемые темпы извлечения полезного компонента. В начальном периоде

эксплуатации технологических скважин характеризуется обстановка довольно выраженной кислой, бикарбонатной зональностью.

К концу 1989 года в эксплуатации находились 33 блока, из них 4 блока с извлечением запасов более 70%, 7 блоков – с извлечением 50%, 22 блока с извлечением менее 50%.

Часть блоков на крайнем юге находились в эксплуатации от 27 до 129 месяцев, причём блоки, обрабатываемые с удельным коэффициентом извлечения более 1,5% в месяц, отличались с хорошими экономическими и технологическими показателями. Процент отработки полигона (кроме юга залежи) к моменту закрытия рудника составлял от 50% до 80% (max).

Юг залежи, на котором располагались опытные блоки БКВ-1, БКВ-2, БКВ-3, блоки с кислородным окислением пласта, отработаны на 20-30%, не считая блоков на крайнем юге, процент извлечения которых составил от 1% до 10% и время отработки от 3 до 10 месяцев.

В 1989 году опытно-промышленные работы на юге залежи прекращены и на весь южный полигон были поданы закачные растворы с концентрацией H_2SO_4 до 6-8 г/л.

Разрабатывалась также технология слабокислотного выщелачивания урана. Ее сущность состоит в переводе карбонатного вещества из породы в раствор в виде иона HCO_3^- при подкислении пластовых вод до $pH=4-5$ и насыщении растворов кислородом воздуха. При сравнении с «жесткой сернокислотной технологией» не уступала по полноте выщелачивания. А по себестоимости продукции экономичнее на 15-20%. Главное же ее достоинство состоит в том, что при ее применении величина водородного показателя пластовых вод, общая минерализация, состав и содержание основных компонентов и после его завершения в пределах контура рудного тела практически не отличается от фоновых значений.

Результаты исследований гидродинамического режима подземных вод и гидродинамической обстановки.

В момент окончания эксплуатации полигон в целом представлял купол депрессии, который был выше среднего пьезометрического уровня бассейна, приблизительно на 40-45 м. На фоне гидродинамического купола ряды откаченных скважин создавали в свою очередь локальные депрессионные воронки. Спустя 5 месяцев после остановки полигона (к 01.01.1991 году) явно выраженных локальных куполов уже нет, т.е. начинает происходить «расползание» растворов (при сохранении общего купола) и начинает формироваться поток подземных вод, направленных на Север и Северо-восток. Уровни остались практически на этой же глубине.

Проведённые в 1994 - 2000 годах анализ представительных проб, отобранных из наблюдательных с прокачкой скважин на залежи № 3 и за её пределами, показали, что остаточные растворы полностью сорбированы вмещающей породой и осажены в породе.