

Министерство энергетики Республики Казахстан
Акционерное Общество «Национальная Атомная Компания «Казатомпром»
Ассоциация «Ядерное общество Казахстана»



СБОРНИК ТРУДОВ

VIII-й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
УРАНОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

3-5 августа 2017, г. Астана, Республика Казахстан



KAZATOMPROM

NATIONAL ATOMIC COMPANY

Астана-2017

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ ПОИСКАХ ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ <i>Кашафутдинов И.В., Петровский В.Б.</i>	121
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТРАБОТКИ ВИСЯЧИХ РУД С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОЦЕССА МОДЕЛИРОВАНИЯ <i>Аманбай М.С., Матаев М.М., Толеуханов А.Е.</i>	126
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СОПРОВОЖДЕНИЯ СООРУЖЕНИЯ СКВАЖИН <i>Койлубаев Э.С., Бейсеитов Д.А.</i>	134
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УРАНА ПЛАСТОВО-ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ТИПА <i>Аманбай М.С., Мырзабек К.А., Молдакулов Н.З., Ефремов А.М., Лукоянов А.В.</i>	138
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ U-FeS ₂ -H ₂ S-ВОДА ДЛЯ УСЛОВИЙ ЗАКИСЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БЛОКОВ ПРИ СПВ УРАНА <i>Пастухов А.М., Скрипченко С.Ю.</i>	142
СПОСОБЫ ЗАКИСЛЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «МЫНКУДУК» УЧАСТОК «ВОСТОЧНЫЙ» И ИХ ОСОБЕННОСТИ <i>Колосов И.Л.</i>	147
ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИПОХЛОРИТА КАЛИЯ <i>Аликулов Ш.Ш.</i>	156
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА МЕСТОРОЖДЕНИЙ «ИРКОЛЬ» <i>Баймолдинов А.Б., Кенжетаев Ж.С., Оралбеков А.Т., Матаев М.М., Копбаева М.П., Мырзабек К.А., Алтынбек А.Д., Салкынбаев М.Б.</i>	158
ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ УРАНА ПРИ ПСВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ <i>Разуваева Т.В., Поезжаев И.П., Мырзабек Г.А., Копбаева М.П., Мырзабек Қ.Ә., Тунгатарова М.С.</i>	162
ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН ПРИ ПСВ УРАНА <i>Кенжетаев Ж.С., Баймолдинов А.Б., Копбаева М.П., Косунов А.О., Матаев М.М., Оралбеков А.Т., Мырзабек К.А., Штайнбрехер А., Фриш Д.</i>	169

ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ УРАНА ПРИ ПСВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ

¹Разуваева Т.В., ¹Поезжаев И.П., ¹Мырзабек Г.А.,
¹Копбаева М.П., ²Мырзабек Қ.Ә., ³Тунгатарова М.С.

¹ТОО «ИВТ», Алматы, Казахстан,

²ТОО «Семизбай-У», Астана, Казахстан,

³КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан.

Достижение управляемости процессами ПСВ с очевидным экономическим эффектом является целью действующих добычных предприятий. В то же время отсутствие возможности прямого оперативного контроля, большая инерционность процесса, растянутость его во времени делают управление добычей довольно сложной задачей с тенденцией к постоянному ухудшению по мере отработки месторождения. В жестких ценовых условиях нет иного пути по поддержанию рентабельности предприятия, кроме как увеличения эффективности отработки залежей. Подразумевает это, прежде всего, снижение издержек при подготовке и эксплуатации блоков, что может быть выражено в:

- оптимизации расходов на ГПР (создание оптимальных схем вскрытия, оптимальное положение фильтров в разрезе, адекватный режим закисления, дебиты и приемистости скважин, баланс по растворам и т.д.);
- оптимизации расходов при добыче (оптимальные ремонтно-восстановительные работы, до- и перебуры скважин, регламенты подачи кислоты, баланс по растворам и т.д.).

В связи с этим эффективное моделирование гидродинамики подземного выщелачивания является актуальной задачей, востребованной сегодня многими предприятиями горно-добывающей отрасли во всем мире.

В мире имеется несколько программ, позволяющих визуализировать гидродинамическое состояние блока (FrontSim из пакета Eclipse, Schlumberger, Visual modflow, Modflow Flex, Waterloo Hydrogeologic, Processing Modflow, Simcore software, и др). Все они достаточно дорогие изделия и не являются технологическими пакетами, т.е. не включают специализированные для добывающих предприятий параметры и характеристики. Имеется специализированная российская разработка (пакет Севмур, Северский филиал МИФИ, Томская обл.), которая является базовым программным обеспечением для ПСВ предприятий РФ. Для предприятий АО «НАК «Казатомпром», имеющей свой базовый пакет проектирования и управления работой блоков, привязанный к собственной базе данных, нет оснований использовать этот комплекс программ.

С другой стороны – проблемы оценки оптимальности потоков технологических растворов не могут быть решены без специализированного моделирования.

В настоящей работе предлагается использование симулятора, позволяющего рассчитывать 3-х мерные гидродинамические модели процесса ПСВ, что в свою очередь поможет выявить недостатки в распределении потоков технологических растворов в горнорудной массе, часто являющейся причиной нештатной работы блоков.

Использование симулятора, позволяющего моделировать гидродинамику процесса ПСВ поможет выявить недостатки в распределении потоков технологических растворов в горнорудной массе, часто являющейся причиной нештатной работы блоков.

В действительности, факторов управления процессом ПСВ совсем немного:

- возможности варьирования концентрацией кислоты в ВР;
- возможности варьирования приемистостями закачных и дебитами откачных скважин (ограничено техническими и гидрогеологическими параметрами, к тому же дебит откачных скважин поддерживается обычно на максимуме, что не всегда верно);
- возможности реверса растворов и добуривания дополнительных технологических скважин.

Можно выделить несколько аспектов оптимизации гидродинамических параметров:

- каждая откачная скважина должна работать в балансе со своим закачным окружением. Задача решается простыми расчетами для гексагональных схем, но не может быть решена без привлечения моделирования для рядных схем;
- интенсивность работы фильтра по длине должна отвечать балансовому оруденению, иными словами, максимум дебита должен приходиться на рудную часть разреза. Это актуально для маломощных рудных прослоев (менее 2 м), в особенности в резко анизотропной по проницаемости среде (переслаивание песков разной зернистости и глин);
- посадка фильтров учитывать возможность гравитационного опускания растворов. В случае невозможности избежать таковое (например, при нештатных остановках блоков), необходимо разработать форс-мажорный регламент по дебитам, чтобы избежать потерь растворов;
- интенсивность проработки ГРМ должна быть такой, чтобы минимизировать образование застойных зон. В большинстве случаев образование застойных зон не несет в себе серьезной угрозы по скорости отработки и выполнению плана для конкретного блока, но для отдельных случаев – богатые рудные тела, попадающие в застойные зоны и невозможность поддержания проектных дебитов блока – образование застойных зон увеличивает время отработки в 1,5 раза и более;
- при двух- и более этажном вскрытии, при отсутствии надежных водоупоров между этажами, велика опасность перетоков растворов и межэтажного каналирования. Это может приводить к недозакисленности ГРМ (может быть принято решение о прекращении подачи кислоты при низких рН, тогда как имеет место переток растворов между этажами) и дальнейшему падению содержания урана в ПР до пороговых для рудника показателей.

Определенные выше случаи неоптимальных потоков технологических растворов должны быть, прежде всего, надежно диагностированы. В ряде случаев это можно сделать путем несложных расчетов фактических объемов закачки в конкретную ячейку и сравнения их с дебитами. Но в большинстве случаев диагностика неоптимальной работы ячеек (блоков) в гидродинамическом аспекте требует проведения модельных построений, которые позволяют визуализировать результат в виде распределения линий тока либо идеального трассера (того, что не реагирует с веществом ГРМ).

На стадиях закисления и отработки возможности управления процессом приобретают особое значение, так как непосредственно влияют на экономические показатели отработки.

При закислении блока критически важными параметрами являются:

- минимизация непроизводительных потерь кислоты за счет законтурного растекания и миграции по вертикали в непродуктивные разности;
- поддержание проектных (плановых) дебитов и приемистостей, регламентной концентрации кислоты в ВР;

- полнота и одновременность достижения проектных показателей для всех ячеек технологического блока;
- отслеживание отклика блока и своевременная реакция на них (с возможным изменением плановых параметров закисления).

В принципе, достижимость названных аспектов закисления заложена в соответствующих регламентах, разрабатываемых на основе лабораторных и натуральных опытов, ОПВ и фактических результатов закисления ранее запущенных блоков.

В большинстве случаев, закисление блока не представляет собой сложной задачи в аспекте соблюдения плановых параметров. Расхождения с параметрами, принятыми как плановые (модельные) возможны при неоптимальной гидродинамике при закислении, реже при неучтенных осложнениях при распределении внутрiformационных водоупоров, что важно при двухэтажном вскрытии. Может выражаться как в латеральном растекании (потерянной кислоте), так и в вертикальной миграции ВР, в случае висячих руд, либо в явлении каналирования. Имеет своей причиной обычно дебалансы между ПР и ВР по ячейкам (или частям блока).

Неоптимальная гидродинамика выразится, прежде всего, в отсутствии баланса между ПР и ВР в пределах ячейки и блока в целом (в последнем случае необходимы поправки на работу соседних блоков). Особенно опасны в этом случае дебаланс в пользу откачки, при наличии прослоев карбонатных песчаников в пределах активной мощности фильтрации. Часто по таким песчаникам образуются каналы, когда кальцит растворяется, а образованный аморфный гипс выносится потоком ВР в виде частиц алевро-глинистой размерности. Как результат, возрастает эффективная пористость, и – при неизменных дебитах, поток уменьшается в своей ширине и мощности, двигаясь по объему с наименьшим сопротивлением. Частицы гипса, а также алевролита и глины переоткладываются в местах падения скорости фильтрации, выше и ниже линии максимальной скорости, кольматируя границы канала, по которому будут мигрировать растворы. Тем самым создается канал, обычно мощностью сопоставимый или несколько меньший, чем длина фильтра, с границами, закольматированными не только алевро-глинистой нерастворимой составляющей, но и гелями железа и алюминия. Переориентировать поток из этого канала невозможно обычными методами; только реверсирование потоков или сооружение дополнительных скважин может исправить ситуацию.

Подобное каналирование также образуется при резком изменении конфигурации сети вскрытия. Расстояния между откачными и закачными скважинами обычно выдерживаются в пределах единого блока достаточно жестко, вариации составляют $\pm 10\%$ от среднего и опасности каналирования не несут. Однако, при двухэтажном вскрытии встречаются ситуации, когда ячейки верхнего и нижнего этажей смещены друг относительно друга на расстояние, большее, чем 1-2% от глубины скважины. При наличии устойчивых водоупоров это не опасно, но в случае гидравлических окон между нижним и верхним этажами вскрытия, потоки разных этажей могут смешиваться, при этом закачные одного этажа начинают работать на откачные другого. Такая ситуация – особенно при большом сдвиге ячеек друг относительно друга - чревата неравномерностью закисления и каналированием.

Иная ситуация создается при недостатке объемов ПР. В случае расположения фильтров на надежном нижнем водоупоре, возможна только непроизводительная потеря кислоты.

В случае неоднородного флуктуирующего из ниже фильтра до воздуха, равном длине фильтра или блоку, велика вероятность миграции ВР вниз по разрезу и концентрацией на нижней поверхности или выщелачивание разницы в удельных весах пластовой воды и ВР [1]. Также известно, что гидродинамические условия процесса определяют скорость фильтрации в зоне разрыва и как результат интенсивность проработки участка пласта реалитетом разрыва, т.е. динамику химического взаимодействия раствора реагента с выщелачиваем в твердый фаз. В то же самое время эти химические процессы влияют на характеристики пласта и меняются гидродинамические условия ПЗ.

При разработке укрупненных месторождений исходными данными по каждому блоку месторождения являются данные по скважинам (координаты, глубина и наименование) блока, а также литологические данные породы и содержание минерала на скважинах. Все эти данные представлены данными на скважинах и имеют пространственно-разрывной характер.

Для построения геологической модели месторождений необходимо обработать большое количество неравномерно распределенных в пространстве данных с применением методов интерполяции для определения основных характеристик разрабатываемого блока. Существует множество различных методик интерполяции данных: линейная интерполяция, интерполяция методом соседних точек, интерполяция методом обратных взвешенных расстояний и метод кригинга с различными вариациями его реализации. Наиболее распространенными методами интерполяции, применяемыми для задач геотехнологии, являются метод обратных взвешенных расстояний (ОВР), метод поверхности тренда и различные вариации кригинга [2].

Данные трехмерной геологической модели, полученные на основе геостатистических расчетов, являются исходными для расчета давления в пласте, линий тока выщелачивающего раствора и других гидродинамических параметров.

Используемый симулятор по расчету 3-х мерной гидродинамической модели процесса добычи полезного компонента методом ПЗВ, содержит:

- модуль импорта входных расчетных данных и создания расчетной сетки, предоставляющий:
 - импорт скважинных данных (координаты, тип скважины, расположение фильтров, наименование скважины) с текстового файла или Excel книги;
 - импорт фильтрационных и минералогических свойств породы (литологический тип, коэффициент фильтрации и концентрация урана) с текстового файла или Excel книги;
 - импорт данных о дебитах в зависимости от типа скважины с текстового файла или Excel книги;
 - возможность создания структурированной, регулярной трехмерной расчетной сетки по заданным координатам;
- расчетный модуль, позволяющий, на узлах расчетной сетки по скважинным данным, проводить 3-х мерную интерполяцию основных фильтрационных и минералогических свойств рудовмещающих пород, таких как литологический тип породы, коэффициент фильтрации и содержание урана;
- программный модуль по моделированию гидродинамики процесса добычи полезного компонента методом ПЗВ, в котором реализованы следующие возможности:
 - расчет распределения давления в пласте, исходя из данных коэффициента фильтрации и дебитов;

- выбор граничных условий между условиями Неймана и Дирихле в зависимости от геологических и гидрогеологических особенностей выбранного для моделирования участка работ;
- выбор метода расчета давления (явный, неявный).

При этом, интервал установки фильтров технологических скважин прописывается вручную или путем импорта данных. Результаты проведенной интерполяции визуализируются графическим редактором в 3-х мерном виде, в плане X-Y по выбранной Z координате и в разрезе X-Z или Y-Z по выбранным Y или X координатам соответственно.

Первичными данными для проведения интерполяции основных фильтрационных характеристик являются геофизические исследования, проведенные в разведочных и технологических скважинах, а также геологическая и гидрогеологическая информации выбранного участка работ. Результатом проведения гидродинамического моделирования является: поле распределение гидродинамического напора в пределах выбранного геометрического контура и поле распределение действительной скорости фильтрации (линии тока):

- Модуль по визуализации исходных данных и полученных результатов в виде разрезов (по x, y и z осям), блоков, кривых линий растекания выщелачивающего раствора, и т.д. Предусмотрена возможность конфигурирования цветов и порогов легенды, фона отображения, захвата снимка для сохранения JPEG рисунков, импорт произвольных контуров с текстовых файлов.
- Модуль экспорта данных для хранения полученных результатов с возможностью экспорта результатов моделирования в распространенных форматах, совместимых с другими визуализаторами (например TecPlot 360®).

Таким образом, используемый симулятор содержит 3-х мерный интерполяционный модуль основных фильтрационных характеристик рудовмещающих пород в пределах выбранного геометрического контура по точечным в плане данным и модуль расчета гидродинамики, в котором на основе разработанной 3D геологической модели производится расчет давления, линий тока в пласте под действием сети скважин.

Общая математическая модель состоит из трех этапов: вычисление геологии, вычисление давления в пласте, вычисление линий тока раствора.

Проведены работы по получению моделей потоков технологических растворов с использованием программного модуля в условиях реального производства на территории рудника «Центральный Мынкудук» ТОО «ДП «ОРТАЛЫК».

В результате моделирования получены модели потоков технологических растворов для выбранного блока. Работа с блоком производилась посредством подключения к ИС «Рудник» и использованием данных, выгруженных из базы данных «Atomgeo».

Было показано, что для выбранного блока, по скважинным данным, использование симулятора позволяет определить фильтрационные свойства, геометрическое распределение руды и литологические свойства породы в межскважинном пространстве, путем вычисления следующих характеристик: коэффициент фильтрации, литологический тип породы, содержание урана. Также был произведен расчет распределения давления и линий тока раствора в пласте по заданным на скважинах дебитам и рассчитанным данным по коэффициенту фильтрации. Результаты были отображены встроенным в симуляторе

визуализатором. Это позволило определить растекание раствора в пласте, что потенциально позволяет выявить зоны закисления, наряду с застойными зонами [3].

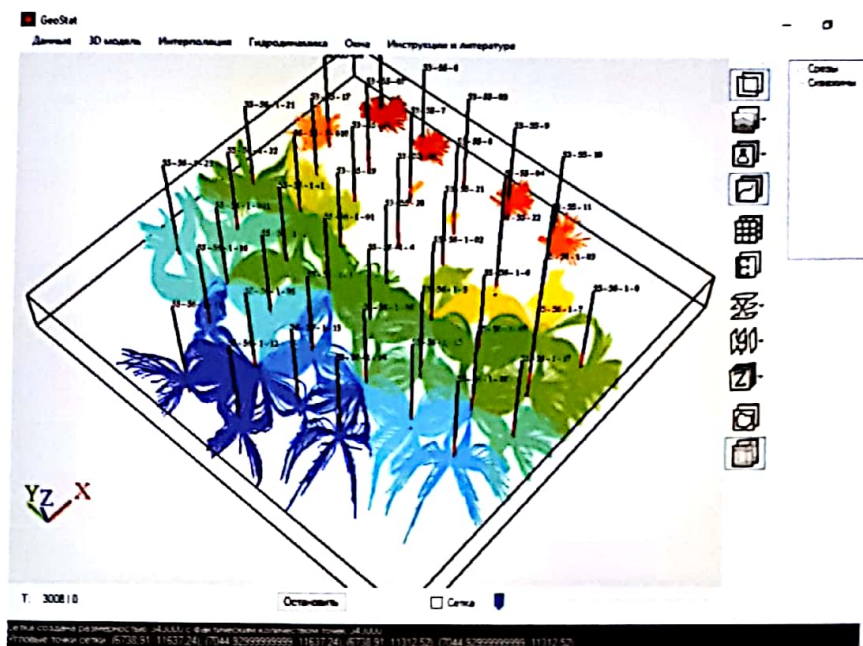


Рисунок 1. Линии токов от закачных скважин к откачным

Была выделена интересующая ячейка с так называемыми «висячими рудами», для которой были продемонстрированы линии токов выщелачивающего раствора на фоне срезов по литологии, коэффициентам фильтрации, распределения урана.

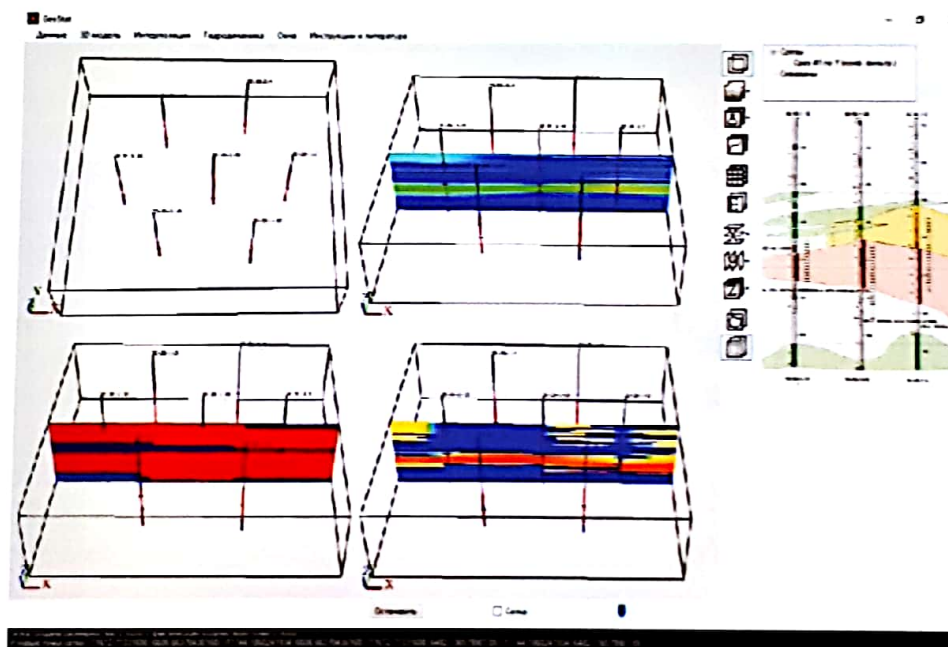


Рисунок 2. Геостатистическая интерполяция для выделенной ячейки (слева направо и вниз: схема ячейки, коэффициент фильтрации, водоупоры, распределение урана и схема оруднения по данным ТОО «ОРТАЛЫК»)

В симуляторе для ячейки была изменена высота фильтров и добавлена закачная скважина рядом с откачной, что позволило визуальнo определить разницу в гидродинамике.

Значимость исследования состоит в оптимизации добычи урана методом ПСВ путем повышения эффективности разработки месторождений, увеличения доли извлекаемого урана и снижения экологической нагрузки на окружающую среду, а именно: подсчет с высокой точностью начальных и текущих объемов урана рассматриваемых участков и выявление богатых зон; оптимальное расположение скважин; мониторинг образования застойных зон и растекания раствора за пределы блока; прогнозирование, контролирование и управление процессом добычи урана регулированием содержания серной кислоты в выщелачивающем растворе, регулированием давления на скважинах и реверсированием потоков в рудном горизонте.

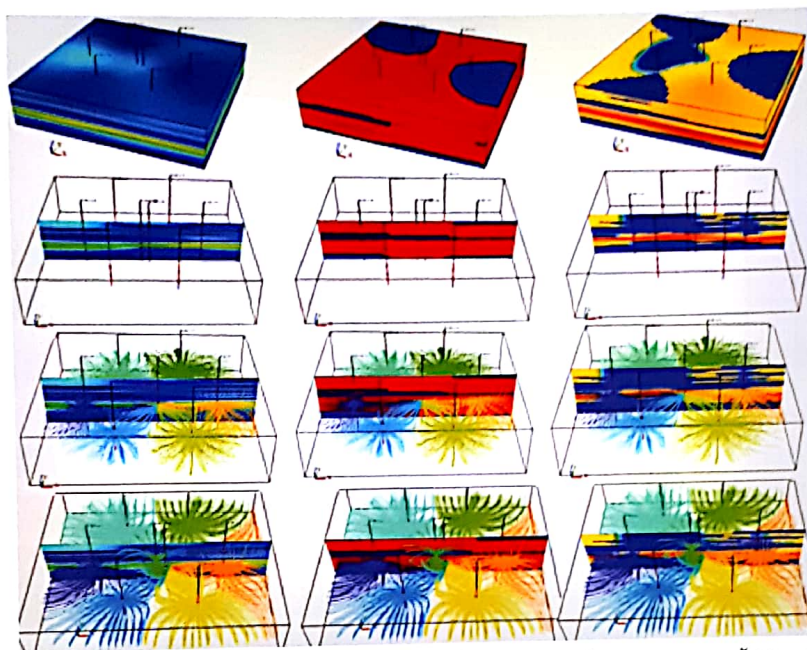


Рисунок 3. Результаты, полученные до и при добавлении дополнительной скважины

Результаты исследования по данному направлению должны улучшить работу проблемных блоков для выполнения контрактных условий предприятий в следующих аспектах:

- уменьшение затрат на добычу/закисление путем исключения непроизводительных потерь кислоты;
- ускорение отработки блока путем оптимизации потоков технологических растворов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Совершенствование управления технологическими параметрами ПВ урана с учетом прогнозных геотехнологических свойств обрабатываемых месторождений. Отчет по проекту № 257/НАК от 11.07.2014 г., научное направление № 3, тема 3.1.А, ТОО «ИВТ», Алматы, 2015.
2. Совершенствование схем вскрытия технологических блоков и полигонов на основе применения моделирования и прогнозирования состояния недр под воздействием подземного выщелачивания. Отчет по проекту №258/НАК-13 от 26.09.2013 г., ТОО «ИВТ», Алматы, 2014.
3. Оптимизация потоков технологических растворов при закислении и отработке блоков. Отчет по проекту № 178/НАК от 18.04.2016 г., ТОО «ИВТ», Алматы, 2017.