

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ
(РОСНЕДРА)**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ИМ. Н.М.ФЕДОРОВСКОГО» (ФГУП «ВИМС»)**

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
с международным участием

**«Геотехнологические методы освоения
месторождений твердых полезных ископаемых»**

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

17-19 ноября 2015 г.

**Научно-практическая конференция
с международным участием**

**«ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ОСВОЕНИЯ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ»**

**17-19 ноября – ФГУП «ВИМС»
Москва, Старомонетный пер. д. 31**

Москва 2016

РАДИОВОЛНОВОЙ МЕТОД 4D МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СПВ

Ю.В. Демехов¹, В.А. Истратов²

1 – АО НАК «КАЗАТОМПРОМ», г. Астана, Республика Казахстан,

2 – ООО «Радионда», г. Москва

При разработке гидрогенных месторождений способом скважинного подземного выщелачивания, добыча металла происходит только из пластов, в которые проникает технологический раствор. Поэтому подсчет запасов на таких месторождениях включает не только оконтуривание рудного тела по бортовому содержанию урана, но и выявление в нем проницаемых областей, доступных для обработки окислителем.

Проницаемость рудовмещающих терригенных пород определяется их глинистостью: чем выше глинистость – тем ниже проницаемость. Электрическое сопротивление пород также в основном обусловлено глинистостью: чем выше глинистость, тем ниже электрическое сопротивление пород. На этой обратной корреляции между глинистостью пород и их сопротивлением, вычисляется осредненный количественный критерий – пороговое значение кажущегося электрического сопротивления, по которому определяются границы интервалов установки фильтров и проводится разделение руд на литолого-фильтрационные типы (литолого-фильтрационная модель). Этот критерий используется и при расчете извлекаемых запасов. Литолого-фильтрационная модель определяется для каждого месторождения путем анализа эмпирических данных электрического каротажа, кернового опробования и пробных откачек. При слабой электрической контрастности пород разреза (от 10 до 50 Ом^{*м}), дисперсия эмпирических данных достаточно большая и надежность определяемого таким способом критерия – невысокая.

Малый радиус действия методов электрического каротажа не обеспечивает получение надежной информации о литологическом строении пород в межскважинном пространстве. Многократные попытки построить объемные карты сопротивлений путем интерполяции данных каротажа показали, что результат будет зависеть от выбранного способа интерполяции и информационной ценности не имеет.

Поэтому представляется необходимым дополнить существующий комплекс геофизических исследований методами исследования межскважинного пространства. Обсадка скважин ПВ полипропиленовыми трубами, создает условия для решения этой задачи методом межскважинного радиоволнового просвечивания. Основным препятствием применению этого метода на урановых месторождениях ПВ до недавнего времени являлось низкое электрическое сопротивление песчано-глинистых водонасыщенных пород рудоносного горизонта, не позволявшее стандартной аппаратурой получить необходимую дальность просвечивания, особенно после их закисления.

Разработанная в ООО «Радионда» современная цифровая высокочувствительная скважинная аппаратура РВГИ-07 (изготовитель – ООО «Тульский геофизический центр»), обеспечивает требуемую дальность просвечивания до 60 м в породах с сопротивлением в первые Ом^{*м} при сохранении высокой разрешающей способности. Главной особенностью аппаратуры является наличие оптико-электрической связи автономных скважинных приборов с управляющим компьютером на поверхности. Это позволило разработать высокоэффективные резонансные скважинные излучатели на частотах 0,03- 0,15 МГц с короткими (3-5 м) антennами и обеспечить высокую чувствительность приемного канала (12 НВт). Измерения проводятся в каждом сечении между соседними скважинами по веерной (томографической) схеме на интервале рудовмещающего пласта с шагом 1 м (рис.1). Разработанная методика 3D-обработки на основе алгоритма волнового восстановления и технология объемного геоэлектрического картирования межскважинного пространства способом радиоволновой геоинтроскопии (РВГИ) позволяет получать достоверные 3D карты распределения электрических свойств пород исследуемого массива.

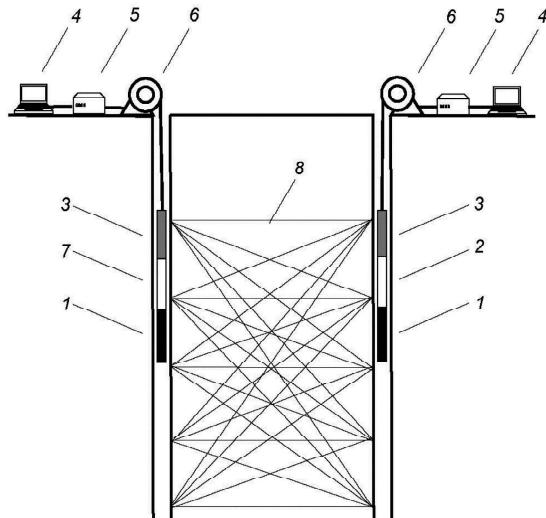


Рис. 1. Измерительная установка для радиоволновых измерений и схема «томографической» съемки РВГИ

1 – антенна, 2 – ретранслятор, 3 – блок оптической развязки, 4 – компьютер, 5 – ретранслятор, 6 – каротажный подъемник, 7 – излучатель, 8 – лучи просвечивания.

Процесс разработки технологического блока способом СПВ можно условно разделить на несколько стадий:

- подготовка блока (бурение скважин, установка колонн и фильтров, освоение);
- закисление (подача растворов кислоты в закачные скважины);
- активное выщелачивание (откачка технологических растворов);
- доработка и вывод из эксплуатации (снижение концентраций, промывка маточными растворами).

Каждая из этих стадий характеризуется конкретными изменениями технологических и геоэлектрических условий и решаемыми задачами (рис.2). Основным фактором является подача в рабочий горизонт выщелачивающего реагента – раствора серной кислоты с начальной концентрацией 15-25 г/л. При таких концентрациях закисляющих растворов сопротивление хорошо проницаемых пород рудовмещающего горизонта падает в 10 и более раз. При этом, сопротивление высоко глинистых непроницаемых интервалов остается практически неизменным. Таким образом, прямая корреляционная зависимость электрического сопротивления пород от количества (концентрации) в них кислотного раствора является физико-геологической основой для применения технологии РВГИ.

Для перевода получаемых 3D геоэлектрических карт эффективных сопротивлений РВГИ в технологические параметры, применяемые на рудниках ПВ, разработаны специальные алгоритмы, схематично представленные на рис.3.

На стадии подготовки технологического блока важной задачей является уточнение его литологического строения и фильтрационных характеристик. Поэтому основным интерпретационным параметром становится расчетный коэффициент фильтрации. Для этого проводится детальное сравнение сопротивлений, полученных по данным каротажа КС и РВГИ, уточняется принятая литолого-фильтрационная модель и пороговое значение. На этой основе строятся 3D карты РВГИ в коэффициентах фильтрации (рис. 4а). На этих картах выделяются и оконтуриваются участки слабопроницаемых пород, которые могут внести существенные для рудничных геотехнологов корректировки в подсчет извлекаемых запасов. Эта карта, полученная до начала закисления, становится базой сравнения для последующих режимных наблюдений РВГИ для мониторинга процесса разработки блока вплоть до его вывода из эксплуатации и оценки наличия остаточных технологических растворов.

Стадия первичного (пассивного) закисления характеризуются подачей в закачные скважины растворов кислоты высокой концентрации и продолжается в зависимости от сети расположения скважин от 70 суток (для сети с расстояниями 45-50 м) до 100 суток (для расстояний 60 м). Поэтому второй цикл измерений РВГИ целесообразно проводить через 60 – 80 суток от начала закисления блока. Измерения проводятся той же скважинной установкой, по той

же схеме и объемах, что и до закисления. Единственным изменением является рабочая частота. Так как общее сопротивление рудовмещающих пород понижается в среднем в 2-5 раз, рабочая частота просвечивания должна быть адекватно снижена в 2-3 раза, чтобы обеспечить необходимую дальность. Уникальность аппаратуры РВГИ-07 заключается в том, что в каждом пункте излучения выполняется настройка излучателя, измеряется и записывается ток в излучающей антенне. Это позволяет привести все данные режимных наблюдений к единым условиям, изменить рабочую частоту таким образом, чтобы сохранить прежнюю разрешающую способность и параметры элементарной ячейки в алгоритме волнового восстановления.

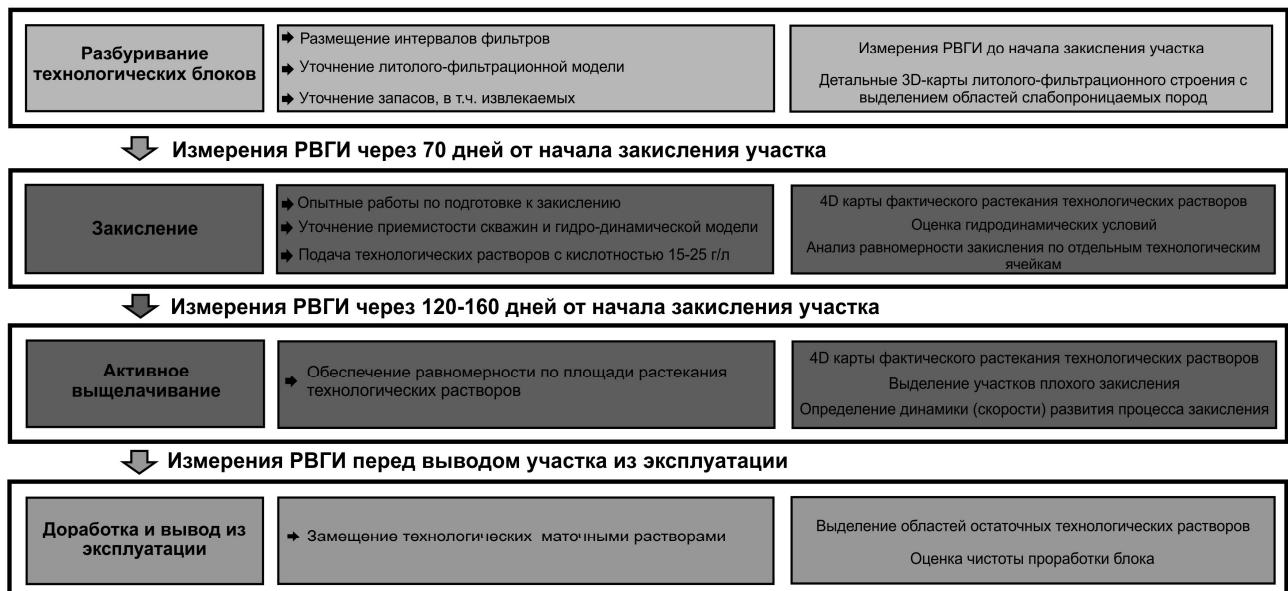


Рис. 2. Стадии разработки урановых месторождений СПВ и задачи РВГИ

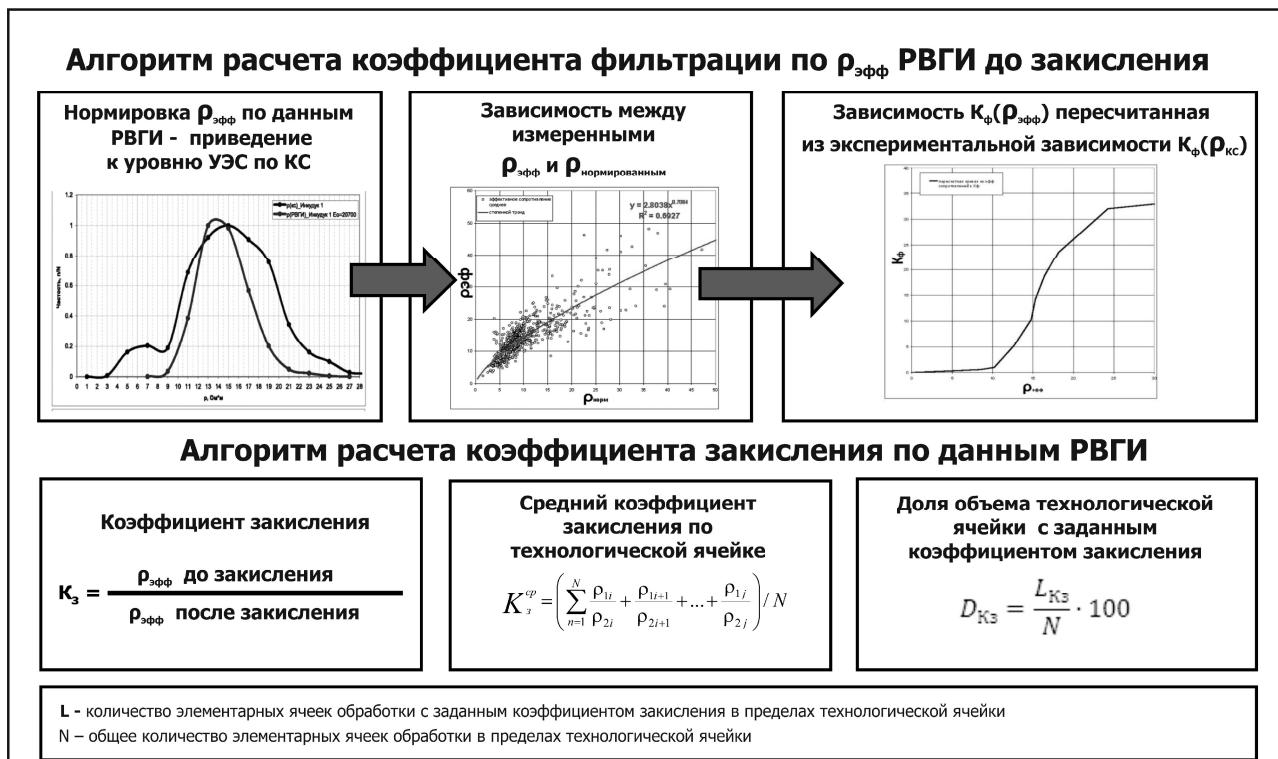


Рис. 3. Алгоритмы пересчета эффективного электрического сопротивления РВГИ в технологические параметры

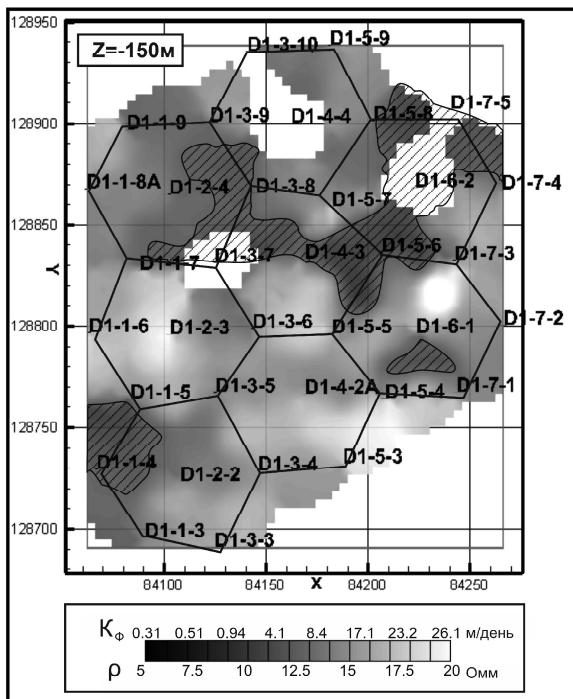


Рис. 4а. Фрагмент 4D карты РВГИ до закисления в изолиниях коэффициента фильтрации

Оценить сопротивление раствора в породах и, соответственно, концентрацию кислоты при известной пористости можно через известную формулу Арчи. Однако, когда имеются измерения, выполненные как до, так и после закисления, изменение пористости внутри исследуемого объема пород совершенно не мешает количественной оценке закисления. В этих условиях для мониторинга главным параметром становится вычисленный из экспериментальных данных коэффициент закисления K_3 , который является отношением сопротивлений пород до и после закисления

Количественное сравнение данных 3D геоэлектрического картирования РВГИ до и после подачи окислителя представляется в виде 4D карты в значениях коэффициента закисления K_3 (рис. 4б). Изменение в названии карты на 4D отражает четвертую координату – время, за которое произошли выявленные изменения параметров. Эта карта дает представление о фактическом растекании кислотных растворов в межскважинном пространстве на данном этапе разработки.

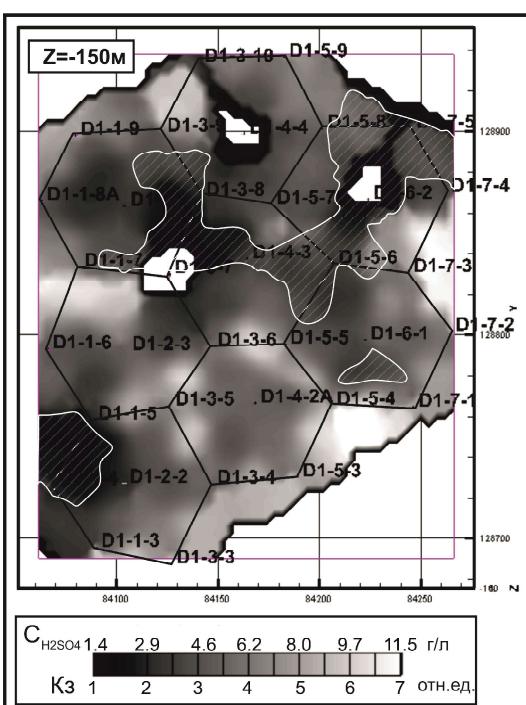


Рис. 4б. Фрагмент 4D карты растекания технологических растворов в изолиниях коэффициента закисления и концентрации H_2SO_4 по данным РВГИ. Полигон «ПВ-1»

Так как основным фактором, определяющим сопротивление пород после закисления, является количество кислоты, становится возможным использование электрического сопротивления для количественной оценки концентрации кислоты в породах. Используя каноническую зависимость удельного электрического сопротивления растворов от их концентрации, зная сопротивление технологического раствора, можно оценить степень его минерализации в эквивалентном содержании серной кислоты (вторая шкала на рис.4б). Сопоставление представленных карт, полученных до и после закисления, показывает соответствие областей низких концентраций с ранее выделенными контурами слабопроницаемых пород. Это дает основание геотехнологической службе своевременно обращать внимание на слабо проработанные участки и обоснованно вносить корректизы в плановые показатели добычи, основываясь на выявленные и ранее неучтенные особенности литологического строения залежи. При работе полигонов в режиме закисления оптимальными считаются растворы с концентрацией 15-20 г/л. На рис.5 представлена карта с изоповерхностью $K_3=4.5$, что для исследуемого участка соответствует значениям $C_{H_2SO_4} \geq 10$ г/л. По данной карте можно судить о степени проработанности исследуемого блока и, в частности, что на данном этапе кислотные растворы сосредоточены в основном на периферийных участках технологических ячеек.

Для количественной оценки развития процесса закисления в конкретной технологической ячейке применяется методика, основанная на расчетах среднего коэффициента закисления K_{3cr} и расчета процентного соотношения плохо-, слабо-, средне- и хорошо- закисленных областей относительно общего объема заданной технологической ячейки – параметра D_{K_3} . Этот параметр выражает процентное содержание элементарных ячеек обработки РВГИ с заданным значением коэффициента закисления от общего объема рассматриваемой технологической ячейки, и рассчитывается по формуле, приведенной в таблице рисунка 3. Рассчитываемые значения сопоставляются со стандартно-определенными технологическими параметрами закисления в откачных скважинах (pH , $C_{H_2SO_4}$ и др.). На их основе устанавливается обобщенная зависимость проработанности блока, выявляются отклонения и нарушения в равномерности развития процесса закисления по каждой технологической ячейке (рис.6).

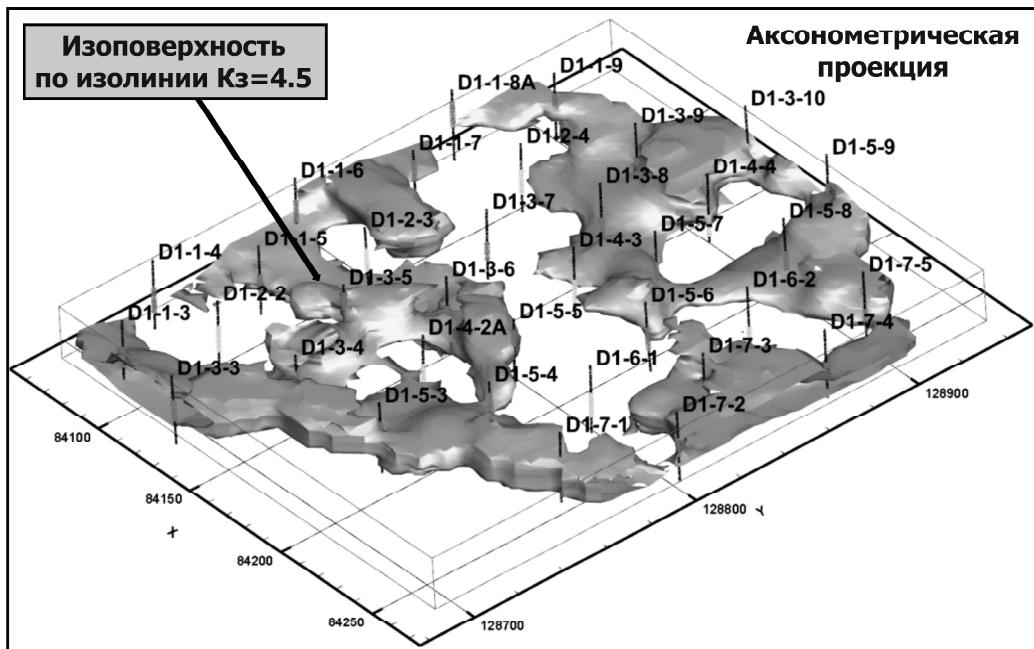


Рис. 5. Фрагмент 4D карты растекания технологических растворов.
Изоповерхность по значению $K_3=4.5$. Полигон «ПВ-1»

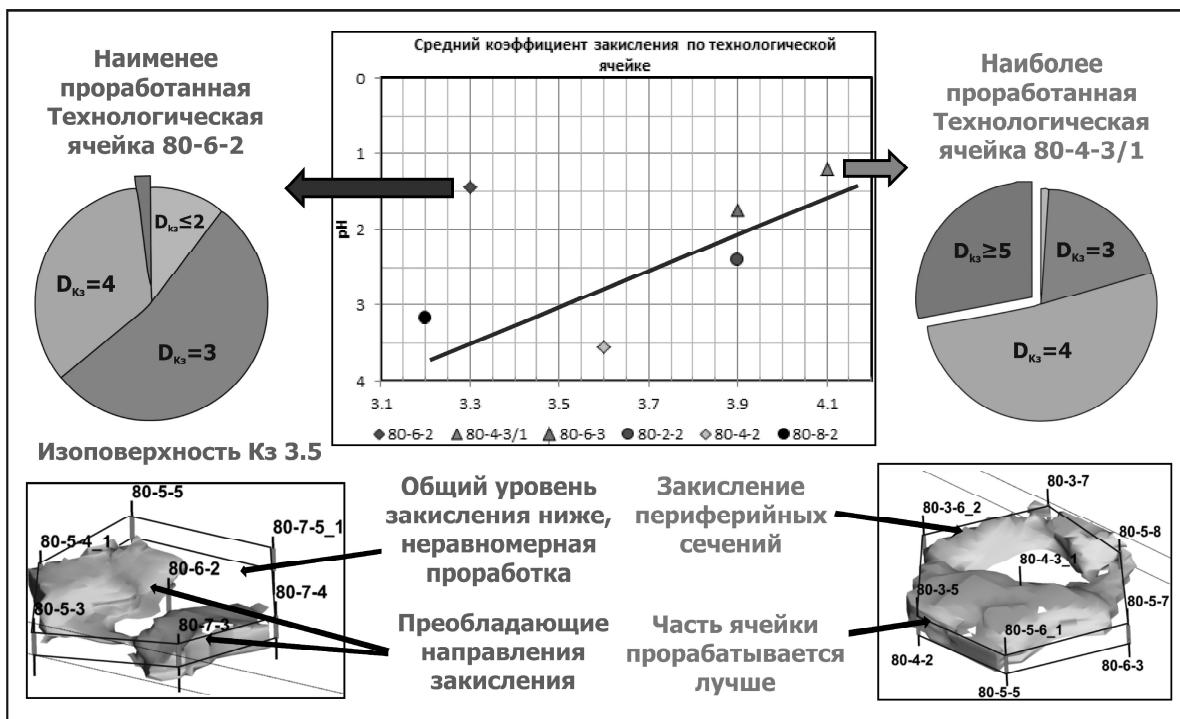


Рис. 6. Сравнение технологических данных по откачным скважинам с результатами межскважинных исследований РВГИ на участке полигона «ПВ-1»

Стадия активного выщелачивания характеризуется включением насосов в откачных скважинах. На этой стадии важно соблюдать гидродинамическое равновесие (баланс объемов закачиваемых и откачиваемых растворов) и равномерное по площади распределение растворов, так как неравномерная проработка блока приводит к значительному снижению технико-экономических показателей общего цикла работ. Для иллюстрации возможностей технологии РВГИ на этой стадии на рис. 7 приведены результаты режимных измерений РВГИ на блоке с рядной системой скважин: в центре – ряд откачных скважин, по краям – ряды закачных скважин. Измерения выполнены в три цикла: до закисления, через 70 дней и 190 дней. На представленных картах видна характерная для рядной сети неравномерность развития процесса закисления в пространстве: наименьшие концентрации растворов и через 190 дней отмечаются в центральной части между откачными скважинами. Наиболее интересна 4D карта коэффициента мониторинга, характеризующая относительные изменения за 120 дней между вторым и третьим циклом измерений. По этой карте кратко отметим следующие моменты:

- «белое пятно» вокруг откачной скважины 132-4, отмечаемое на всех картах, связано с ее нерабочим состоянием (нарушением технической колонны);
- «белое» пятно между скважинами 132-8 и 132-9 и 131-9 – незакисленная область, соответствующая линзе высоко глинистых пород. Эта линза была выделена и оконтурена на 3D карте РВГИ еще до начала закисления. Практическое отсутствие динамики закисления в этой области служит основанием для принятия технологических решений;
- область между закачными скважинами 133-5 и 133-6, в которой за 120 дней отмечено снижение концентрации раствора. Причиной этого эффекта является то, что до начала отработки блока эти закачные скважины использовались как полигон для пробного закисления и вокруг них образовались линзы высоких концентраций на границе блока. С включением насосов и переходе к активному выщелачиванию избыточная концентрация растворов стала снижаться и постепенно выравниваться по объему ячейки.

Это результат показывает, что технология РВГИ может быть использована для количественной оценки динамики процесса во времени, а на стадии доработки блока – для оценки качества проработки и отсутствия в межскважинном пространстве областей с остаточными концентрациями технологических растворов.

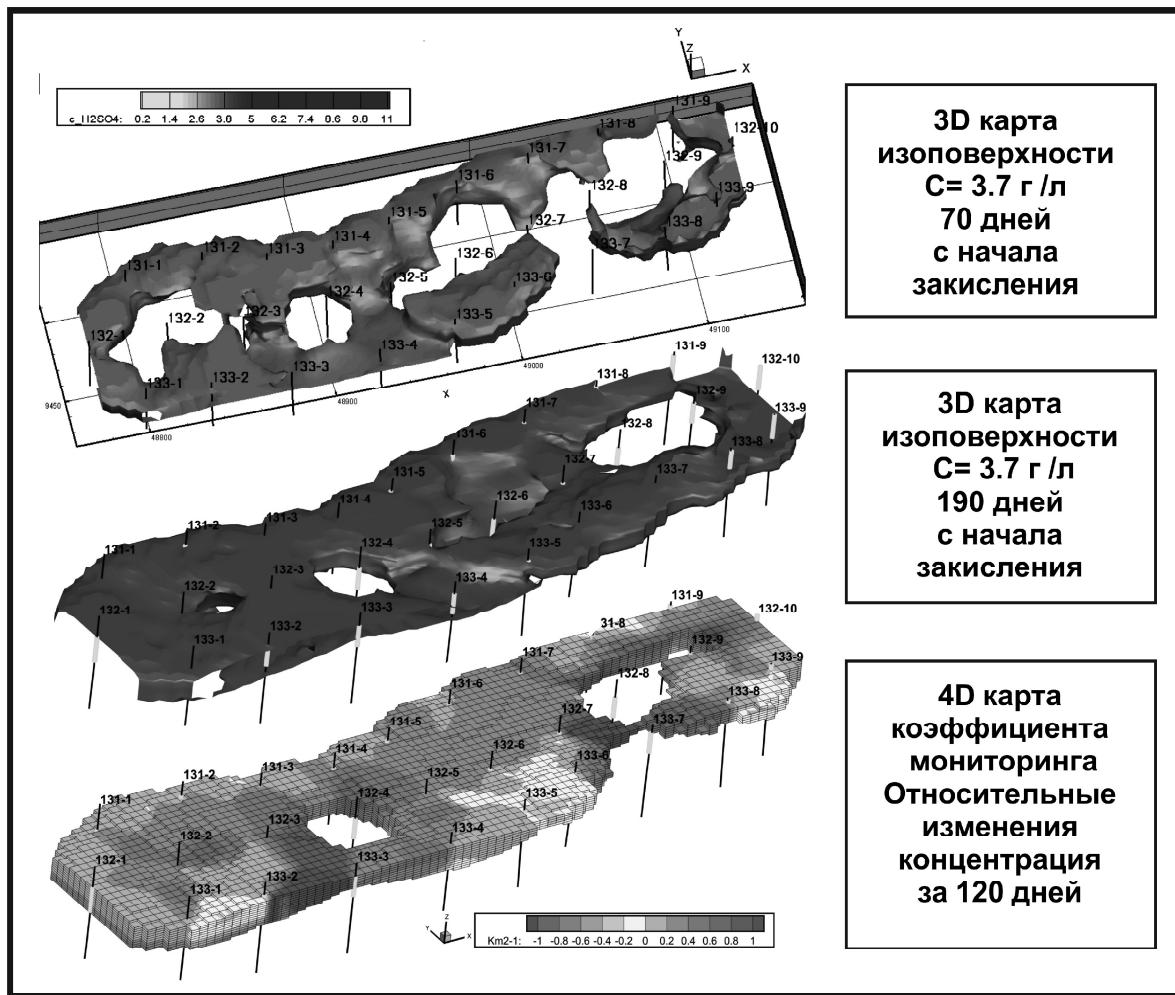


Рис. 7. Результат 4D мониторинга РВГИ процесса закисления

Выводы:

Сравнительный анализ результатов РВГИ с данными, полученными методами, используемыми в регулярной практике отработки месторождений СПВ (электрокаротаж КС, ИК, химический анализ растворов и др.), показал их хорошее взаимное соответствие и дополняемость при оценке эффективности процесса выщелачивания.

Установленные корреляционные связи между интерпретационными параметрами РВГИ, электрическими свойствами пород продуктивного горизонта и технологических данных (рН, концентрация кислоты) позволяют проводить их комплексную геолого-технологическую интерпретацию на принципиально новом уровне. Сочетание количественных показателей по скважинам с визуализацией процесса растекания растворов в межскважинном пространстве технологических ячеек открывает перед технологической службой рудника новые возможности по управлению процессом разработки залежи, рациональному использованию кислоты, уточнению фактических объемов извлекаемых запасов.

Экспериментально достигнутые в геолого-технологических условиях рудников СПВ эффективная дальность просвечивания $R=50$ м и разрешающая способность (минимальный размер уверенно выявляемой неоднородности $D \leq 9$ м и точность локализации кромки $\delta \approx 3$ м) обеспечивают решение поставленных задач:

- уточнение литолого-фильтрационного строения технологических блоков с выделением и оконтуриванием областей слабопроницаемых пород;
- получение достоверной информации о фактическом растекании кислотных растворов в межскважинном пространстве,
- количественная оценка степени проработанности блока в заданный период времени и динамики отработки блока в пространстве и времени.