

ТЕХНОЛОГИЯ РАДИОВОЛНОВОЙ ГЕОИНТРОСКОПИИ МЕЖСКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

¹Демехов Ю.В., ²Истратов В.А.

¹АО НАК «Казатомпром», Астана, Казахстан

²ООО «Радионда СПВ», Москва, Россия

При разработке гидрогенных месторождений урана способом скважинного подземного выщелачивания (СПВ), 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 пород, тем ниже их электрическое сопротивление. Зависимость между глинистостью пород и их сопротивлением определяется эмпирически для каждого месторождения путем анализа данных электрического каротажа, кернового опробования и пробных откачек. На основе этой обратной корреляции создается литолого-фильтрационная модель месторождения и устанавливается осредненный количественный критерий – пороговое значение кажущегося электрического сопротивления. По этому критерию выделяются интервалы установки фильтров, проводится разделение руд на литолого-фильтрационные типы и подсчитываются извлекаемые запасы. На практике применяется только стандартный каротаж сопротивлений на постоянном токе КС. Однако у этого старого и, в целом, надежного метода, есть несколько недостатков. Его результаты сильно зависят от целого ряда факторов: диаметра скважины, сопротивления бурового раствора и пластовых вод, размера зонда, наличия и диаметра зоны проникновения. Существенные различия технологических условий в разведочных и эксплуатационных скважинах нередко приводят к несоответствиям между данными КС. При слабой электрической контрастности пород (от 10 до 50 Ом^{*}м), в эмпирически полученных данных наблюдается достаточно большая дисперсия, что снижает надежность определяемого критерия.

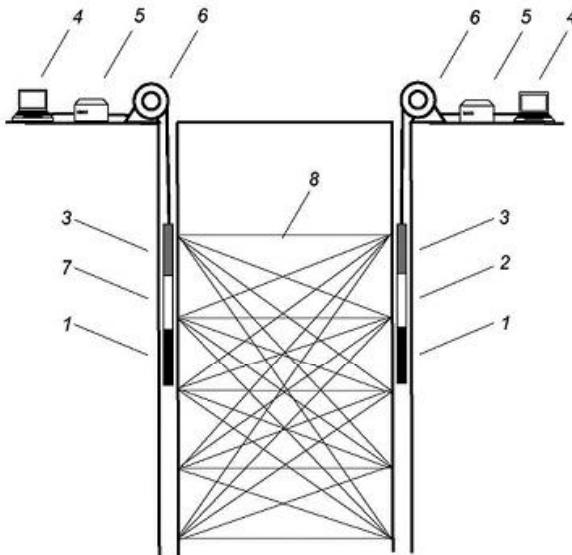
Сравнение диаграмм ρ_k , полученных по данным измерений до и после закисления, показывает, что эффективное сопротивление слабопроницаемых глин, в которые не проникла кислота, остается практически неизменным. Напротив, электрическое сопротивление проницаемых песков, ранее самых высокомомых, после замены пластового флюида раствором серной кислоты резко понижается до значений, заметно ниже уровня сопротивления глин. Таким образом, электрическое сопротивление пород после закисления полностью определяется содержанием в них кислоты. Для количественной оценки закисления можно предложить параметр $K_z = \rho_{n1}/\rho_{n2}$ (коэффициент закисления), где ρ_{n1} , ρ_{n2} – сопротивление пород до и после закисления.

Небольшая глубина исследований методами электрического каротажа не обеспечивает получение надежной информации о растекании окислителя в межскважинном пространстве. Многократные попытки построить объемные карты сопротивлений путем интерполяции данных методов каротажа показали, что результат будет зависеть от выбранного способа интерполяции и информационной ценности не имеет.

В целом, указанные недостатки применяемых электрических методов исследования скважин могут приводить к существенным ошибкам при подсчете запасов и сказываться на эффективности разработки. Достоверный контроль за фактическим растеканием растворов в литологически неоднородном межскважинном пространстве можно выполнить только методами скважинной геофизики.

Поэтому представляется необходимым дополнить существующий комплекс геофизических исследований методами исследования межскважинного пространства. Обсадка скважин ПВ полиэтиленовыми 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 рудносного горизонта, не позволявшее стандартной аппаратурой получить необходимую дальность просвечивания, особенно после 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 управляемым компьютером на поверхности. Это позволило разработать высокоеффективные резонансные скважинные излучатели на частотах 0,03-0,15 МГц с короткими (3-5 м) антеннами 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.



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

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

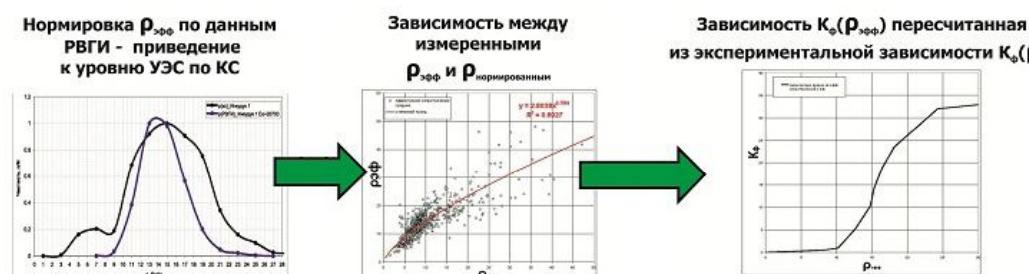
Процесс разработки технологического блока способом СПВ можно условно разделить на несколько стадий:

- подготовка блока (бурение и освоение скважин, установка колонн и фильтров);
- 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 применения технологии РВГИ.



Рисунок 2. Стадии разработки урановых месторождений СПВ и задачи РВГИ



Алгоритм расчета коэффициента закисления по данным РВГИ

$$K_o = \frac{\rho_{\text{эфф}} \text{ до закисления}}{\rho_{\text{эфф}} \text{ после закисления}}$$

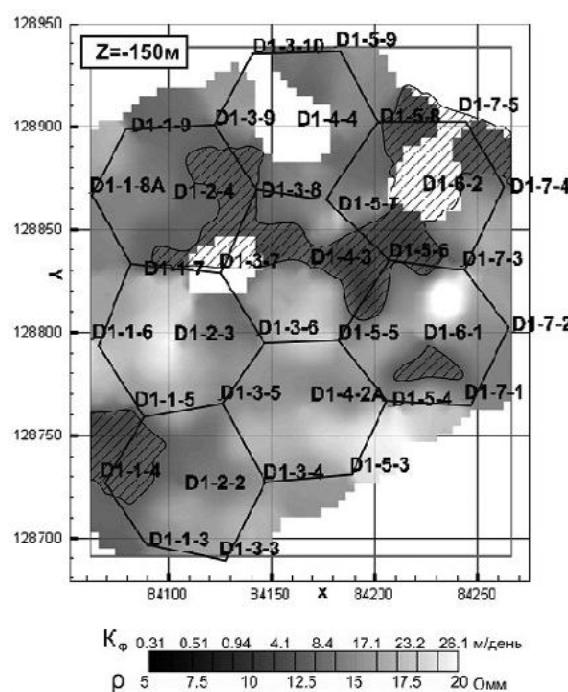
$$K_o^P = \left(\frac{\rho_1 + \rho_{1+1} + \dots + \rho_{L/2}}{\rho_{2L}} \right) / N$$

L – количество элементарных ячеек обработки с заданным коэффициентом закисления в пределах технологической ячейки
 N – общее количество элементарных ячеек обработки в пределах технологической ячейки

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

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.4). 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.



таким образом, чтобы сохранить прежнюю разрешающую способность и параметры элементарной ячейки в алгоритме волнового восстановления.

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.5). Изменение названия карты на 4D отражает четвертую координату – время, за которое произошли выявленные изменения параметров. 4D карта дает представление о фактическом растекании кислотных растворов в межскважинном пространстве на данном этапе разработки.

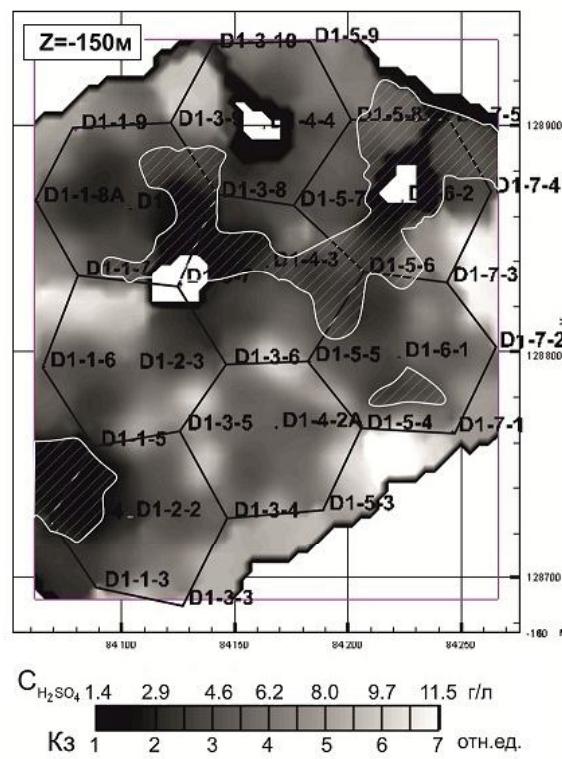


Рисунок 5. Фрагмент 4D карты растекания технологических растворов в изолиниях

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.5). Сопоставление представленных карт, полученных до и после закисления, показывает соответствие областей низких концентраций с ранее выделенными контурами слабопроницаемых пород. Это дает основание геотехнологической службе своевремен-

но обращать внимание на слабо проработанные участки и обоснованно вносить корректировки 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.6 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.

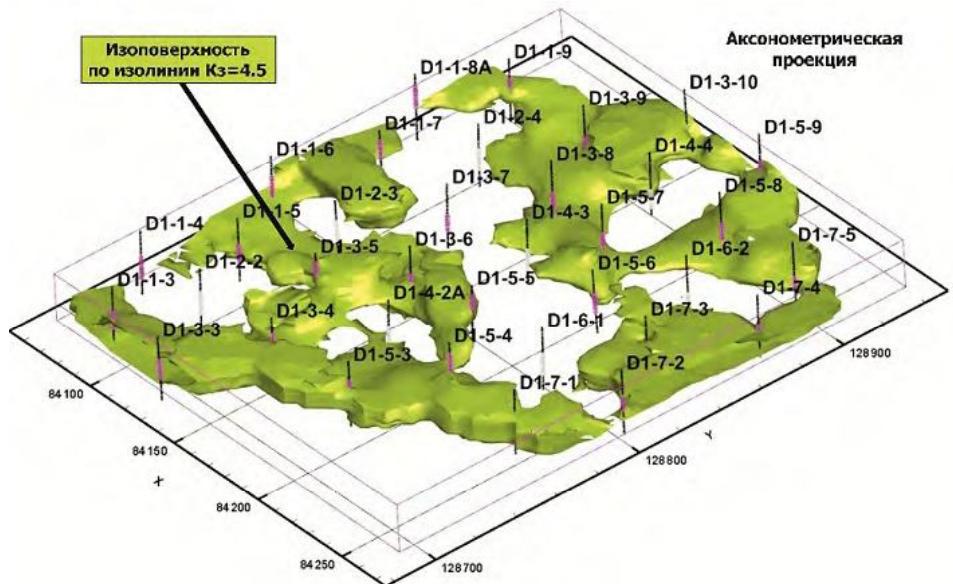


Рисунок 6. Фрагмент 4D карты растекания технологических растворов.
Изоповерхность по значению $K_3=4.5$. ПолYGON «ПВ-1»

Для количественной оценки развития процесса закисления в конкретной технологической ячейке применяется методика, основанная на расчетах среднего коэффициента

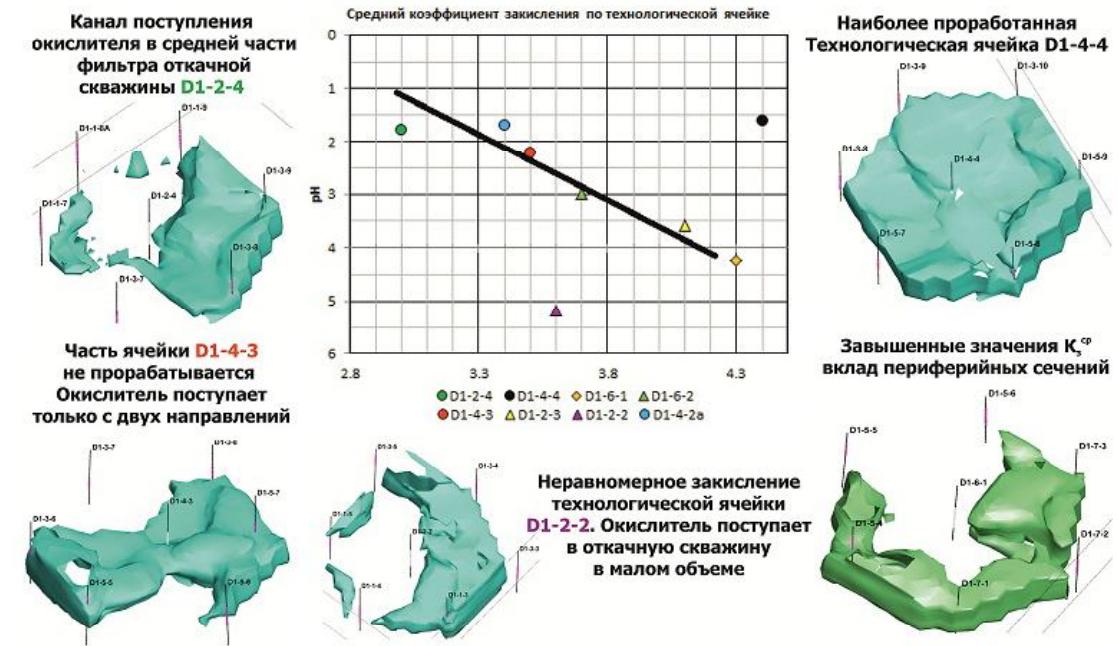


Рисунок 7. Сравнение технологических данных по откачным скважинам с результатами межскважинных исследований РВГИ на участке полигона «ПВ-1»

закисления K_3 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 стандартными технологическими параметрами закисления в откачных скважинах (pH , CH_3SO_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.7).

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. 8 приведены результаты режимных измерений РВГИ на блоке с рядной системой скважин: в центре – ряд откачных

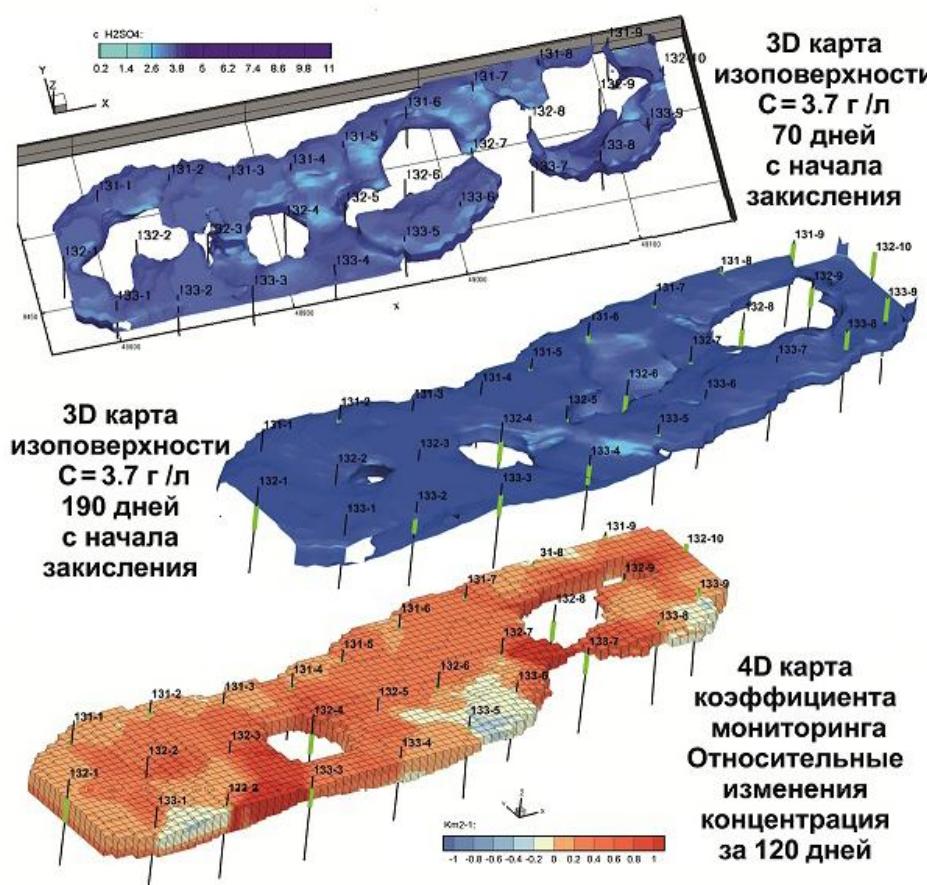


Рисунок 8. Результат 4D мониторинга РВГИ процесса закисления

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: наимень-

шие 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 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. Этот 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.

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ результатов РВГИ с данными, полученными методами, используемыми в регулярной практике отработки месторождений СПВ (каротаж КС, ИК, химический анализ растворов и др.), показал их хорошее взаимное соответствие. Установленные корреляционные связи между интерпретационными параметрами РВГИ, электрическими свойствами пород продуктивного горизонта и технологическими данными (pH , концентрация кислоты) позволяют проводить их комплексную геологотехнологическую интерпретацию на принципиально новом уровне. Сочетание количественных показателей по скважинам с визуализацией процесса растекания растворов в межскважинном пространстве 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.