

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Серго Орджоникидзе

**Колбенков Алексей Викторович**

**ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОВОЛНОВОГО МЕТОДА  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА РАЗРАБОТКОЙ  
УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СПОСОБОМ ПОДЗЕМНОГО  
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ**

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы  
поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**  
Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в ООО «Радионда LTD»

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Даев Дмитрий Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,  
профессор Хмелевской Виктор Каземирович

кандидат технических наук,  
доцент Орлов Владимир Николаевич

Ведущая организация: ОАО «ВНИИХТ»

Защита диссертации состоится «11» марта 2010 г. В 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.121.07 при Российском Государственном Геологоразведочном Университете им. Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, РГГРУ, ауд. 6-38.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Российского Государственного Геологоразведочного Университета.

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2009 года.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.121.07  
доктор технических наук, проф. РГГРУ



Каринский А.Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Скважинное подземное выщелачивание (ПВ) является эффективным и экологически наиболее безопасным способом добычи урана. При подземном выщелачивании по системе скважин через продуктивный пласт прокачивается окислитель (раствор серной кислоты), который переводит соединения урана в растворимое состояние и позволяет производить его добычу путем откачки урансодержащих растворов. Эффективность добычи в значительной мере зависит от качества проработки рудовмещающего пласта раствором окислителя.

Основная проблема, возникающая при реализации этого метода, заключается в том, что в настоящее время, как правило, не удается получить достаточно достоверную информацию о строении рудного массива для того, чтобы регулировать технологический процесс с целью максимального извлечения полезного компонента и снижения себестоимости добычи. Особенно актуальна эта проблема для урановых месторождений, залегающих в отложениях речных палеодолин и характеризующихся неоднородностью литологического состава рудовмещающих пород.

Закисление продуктивного горизонта и извлечение полезного компонента осуществляется неравномерно, преимущественно из наиболее проницаемых зон. Присутствие окислителя в породах гарантирует извлечение в этой области металла и наоборот. Слабопроницаемые участки не охвачены выщелачиванием и в них остаются неотработанные запасы. Недостаток информации проявляется, прежде всего, в том, что размеры этих зон и их положение в межскважинном пространстве достоверно неизвестны.

Опыт геофизических работ на урановых месторождениях ПВ свидетельствует о том, что электрические свойства являются наиболее контрастной и информативной характеристикой рудовмещающих пород и руд. Этот факт обуславливает широкое применение электрического каротажа (в первую очередь метод КС) при разведке и обустройстве участков ПВ.

Однако оборудование скважин полиэтиленовыми обсадными колоннами и фильтрами исключает повторное использование метода КС при эксплуатации месторождения. Для переменного электромагнитного поля полиэтиленовая обсадная колонна скважины не является экраном, что открывает электромагнитным методам геофизики широкие возможности для мониторинга процесса распространения окислителя, сильно изменяющего первоначальное электрическое сопротивление пород. Для контроля процесса выщелачивания широко применяется индукционный каротаж (ИК).

Практика показывает, что применяемый комплекс геофизических методов не в полной мере обеспечивает решение, как разведочных, так и эксплуатационных задач. Недостатком каротажа является его малая глубинность, ограниченная областью, непосредственно прилегающей к стенке скважины.

В условиях месторождений, обрабатываемых способом ПВ, большими потенциальными возможностями обладает метод радиоволнового просвечивания. С его помощью можно в принципе осуществить пространственно-временной мониторинг процесса разработки месторождения и решить ряд сопутствующих задач.

Однако, для реализации возможностей метода радиоволнового просвечивания при разработке месторождений урана потребовался большой объем исследовательских и опытно-методических работ, чему и посвящена данная диссертация.

**Цель работы** – создание технологии радиоволновых исследований межскважинного пространства для контроля распространения окислителя на урановых месторождениях, разрабатываемых способом подземного выщелачивания.

#### **Задачи исследования**

1. Изучение электрических свойств разреза, исследование геологических и технологических условий месторождений ПВ на различных этапах разработки.
2. Изучение влияния мешающих факторов и разработка методики радиоволновых измерений для определения электрических свойств пород на урановых месторождениях.
3. Создание технологии радиоволновых исследований для мониторинга процесса распространения выщелачивающих растворов.
4. Экспериментальное опробование технологии радиоволновых исследований на действующих рудниках ПВ для решения практических задач.

#### **Научная новизна**

1. Установлено, что после подачи проводящего окислителя происходит кардинальное изменение геоэлектрической картины в пределах рабочего горизонта – сопротивление ранее высокоомных проницаемых песчано-гравийных отложений падает ниже уровня сопротивления непроницаемых глин. Доказана возможность проводить пространственно-временной мониторинг процесса распространения окислителя по характеру изменения электрических свойств разреза.
2. Оценено влияние обсадной полиэтиленовой колонны, перфорации в интервале продуктивного пласта и проводящего кислотного раствора в стволе скважины на

разрешающую способность радиоволнового метода для односкважинной и межскважинной установок.

3. Разработана технология радиоволновых исследований для контроля распространения окислителя в межскважинном пространстве, включающая создание специальных скважинных установок, методики измерений и приемов интерпретации.

#### **Практическая ценность**

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана технология радиоволновых исследований для контроля распространения окислителя в межскважинном пространстве, позволяющая повысить эффективность разработки урановых месторождений ПВ.

#### **Основные защищаемые положения**

1. Резкое уменьшение удельного сопротивления проницаемых продуктивных пород после закисления на фоне не меняющегося сопротивления непроницаемых глин и алевролитов обеспечивает возможность осуществления пространственно-временного мониторинга процесса разработки урановых месторождений способом подземного выщелачивания с помощью радиоволнового метода.

2. На основе выполненных теоретических расчетов, физического моделирования и экспериментов в скважинах изучено влияние основных геотехнологических факторов (низких электрических сопротивлений пород и растворов, полиэтиленовых обсадных колонн и интервалов перфорации) на результаты односкважинных и межскважинных радиоволновых измерений и определены технические параметры эффективных скважинных измерительных установок, методики исследований и обработки данных.

3. Теоретически и экспериментально показано, что необходимая эффективная дальность просвечивания 50 м в низкоомном геоэлектрическом разрезе может быть достигнута на рабочих частотах 61- 312 кГц только при использовании измерительных установок с управляемыми скважинными излучателями, обеспечивающими согласование коротких комбинированных антенн в каждой точке излучения при одновременной регистрации величины тока на входе антенны.

4. Надежное решение задачи пространственно-временного мониторинга процесса распространения выщелачивающих растворов возможно на основе сравнительного анализа 3D-геоэлектрических карт эффективных сопротивлений, построенных по результатам радиоволнового просвечивания межскважинного пространства способом радиоволновой геоинтроскопии (РВГИ). Технология ОГК-РВГИ позволяет уточнить литолого-физические характеристики пород продуктивного горизонта, выявить основные особенности

морфологического строения залежи в межскважинном пространстве и позволяет осуществлять контроль за динамикой движения окислителя с требуемой точностью.

### **Личный вклад автора**

Непосредственное участие в этих работах автор принимает с 2005 года сначала в качестве инженера-стажера (дипломное проектирование), а с 2006 года, после поступления в аспирантуру РГГУ, старшего геофизика, ответственного исполнителя опытно-методических работ. При получении материалов, послуживших основой настоящей работы, вклад автора заключался в следующем:

1. Расчет электрического поля осевого электрического диполя в присутствии цилиндрических границ по алгоритмам и программам проф. А.Д. Каринского и анализ результатов применительно к технологическим условиям ПВ.

2. Выполнение физического моделирования с целью выявления и оценки влияния полиэтиленовой обсадной колонны и сопротивления раствора скважины на диаграмму направленности электрического диполя, а также на возможность обнаружения слабоконтрастных локальных объектов.

3. Экспериментальные исследования в скважинах с целью выбора оптимальных параметров рабочих установок, обеспечивающих дальность просвечивания в условиях низкоомной (единицы Ом·м) среды и ограниченного интервала измерений.

4. Участие в опытно-производственных испытаниях на Далматовском, Хиагдинском и Букинайском урановых месторождениях.

5. Обработка полученных материалов, построение 3D-геоэлектрических карт и геолого-технологическая интерпретация результатов.

### **Реализация работы**

Созданная технология была опробована при опытно-производственных работах на Далматовском, Хиагдинском и месторождении Северный Букинай (Узбекистан). Материалы диссертации были использованы при составлении методических рекомендаций «По применению технологии объемного геоэлектрического картирования методом радиоволновой геоинтроскопии (ОГК-РВГИ) на объектах Навоийского ГМК», а также при решении практических геолого-технологических задач на действующих блоках Хиагдинского уранового месторождения (ЗАО «Хиагда»).

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты работы докладывались на конференции РГГРУ «Молодые – наукам о Земле - 2006», четвертой международной научно-практической конференции "Инженерная и рудная геофизика - 2008" (Геленжик), на Координационном

научно-техническом совещании ФГУП «ВНИИА» «Современное состояние и перспективы развития геофизических методов исследования урановых месторождений» - ноябрь 2008 г., Научно-техническом совете Навоийского ГМК.

### **Публикации**

Результаты диссертации изложены в 4 научных работах.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения общим объемом 145 страниц, включая 50 рисунков и 3 таблицы. Список литературы включает 46 наименований.

Исходной методологической и теоретической базой для исследований автора послужили основополагающие работы отечественных ученых по теории и методике радиоволнового просвечивания. Первые опыты по радиопросвечиванию на рудных месторождениях и в многолетнемерзлых породах были выполнены под руководством А.А. Петровского в 1920-х – 30-х гг. С середины 1940-х годов исследованиями в этой области занималась группа ленинградских ученых (А.Г. Тархов, Г.А. Череменинский, А.С. Вешев и др.), а с 1954 г. планомерные исследования были начаты в МГРИ (Д.С. Даев, А.Г. Тархов, А.Д. Петровский, М.И. Плюснин, В.М. Бондаренко, Н.Д. Коваленко) и МГУ (В.К. Хмелевской). Необходимо отметить теоретические и экспериментальные работы по радиопросвечиванию, выполненные в 1960-х – 80-х гг. в ЦНИГРИ под руководством А.Д. Петровского (А.А. Грачев, А.А. Тужилин и др.), в ВИРГе (А.П. Савицкий, Г.В. Редько и др.) и ЛГУ (О.М. Морозова). Наиболее полно теоретические основы радиоволнового метода изложены в монографии А.Д. Петровского (1971 г.), а аппаратно-методические особенности и опыт производственных работ приведены в руководстве по радиоволновым методам под редакцией А.А. Попова, А.Д. Петровского (1977 г.).

Существенному расширению возможностей метода послужила разработанная в ЦНИГРИ Г.Ф. Гуревичем и Б.Ф. Борисовым методика «дальнего радиопросвечивания» в анизотропных средах с применением относительно низких радиочастот (1984 г.). В развитие этой методики в ООО «Радионда LTD» (В.А. Истратов и др.) для рудных и нефтяных месторождений была разработана технология объемного геоэлектрического картирования способом РВГИ (1996 г.), и с 2003 г. начаты работы по адаптации этой технологии к геотехнологическим условиям на урановых месторождениях ПВ Узбекистана и России.

Автор выражает глубокую благодарность профессору, доктору технических наук Д.С. Даеву и кандидату технических наук В.А. Истратову за научное руководство, внимание и содействие в подготовке и написании диссертации. Автор искренне благодарен профессору А.Д. Каринскому за консультации и замечания при завершении работы. Автор благодарен

С.О. Перекалину, А.В. Скриннику и всему коллективу ООО «Радионда LTD» за помощь в проведении исследований. Автор признателен главному инженеру ЗАО «Хиагда» А.Г. Мирзояну и генеральному директору ЗАО «Русбурмаш», к.т.н. Риос Э.Д.Р. за поддержку при внедрении разработанной методики.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулированы актуальность темы диссертации, изложены цели и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** изложены физические основы радиоволнового метода, приведены сведения по геологии и технологии добычи, построена геоэлектрическая модель уранового месторождения, разрабатываемого способом ПВ, составлена геоэлектрическая модель самого процесса выщелачивания.

### *Физические основы радиоволнового метода.*

Радиоволновой метод основан на зависимости интенсивности поглощения энергии радиоволн породами, расположенными на трассе распространения волны, от их электрических характеристик: удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ).

Схема межскважинных измерений представлена на рисунке 1а. При фиксированном положении передатчика в одной скважине, производится измерение напряженности поля по профилю приемника в соседней скважине. После этого передатчик смещается и измерения повторяются. Как видно из схемы измерений, путем многочисленного перекрытия лучей просвечивания по различным направлениям достигается высокая детальность исследования межскважинного пространства.

В однородной изотропной среде амплитуда электрической меридиональной компоненты напряженности поля  $E$  переменного электрического диполя в волновой зоне имеет следующий вид (в сферической системе координат):

$$E_{\theta} = E_0 \frac{e^{-k''R}}{R} f(\theta) \quad (1)$$

где  $R$  (м) – расстояние между излучающим и приемным диполями,

$f(\theta)$  – функция, учитывающая взаимное расположение излучающего и приемного диполей в пространстве.

$k''$  (1/м) – коэффициент поглощения,

$E_0$  (мкВ·м) – аппаратный параметр приемо-передающей установки, определяемый выражением:

$$E_0 = \frac{I \cdot \mu_0 \cdot f \cdot l_r \cdot l_t}{2} \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где  $I$  (А) – ток в излучающей антенне,

$\mu_0$  (Гн/м) – магнитная проницаемость вакуума,

$f$  (Гц) – частота электромагнитного поля,

$l_r, l_t$  (м) – действующие высоты приемной и передающей антенн соответственно.

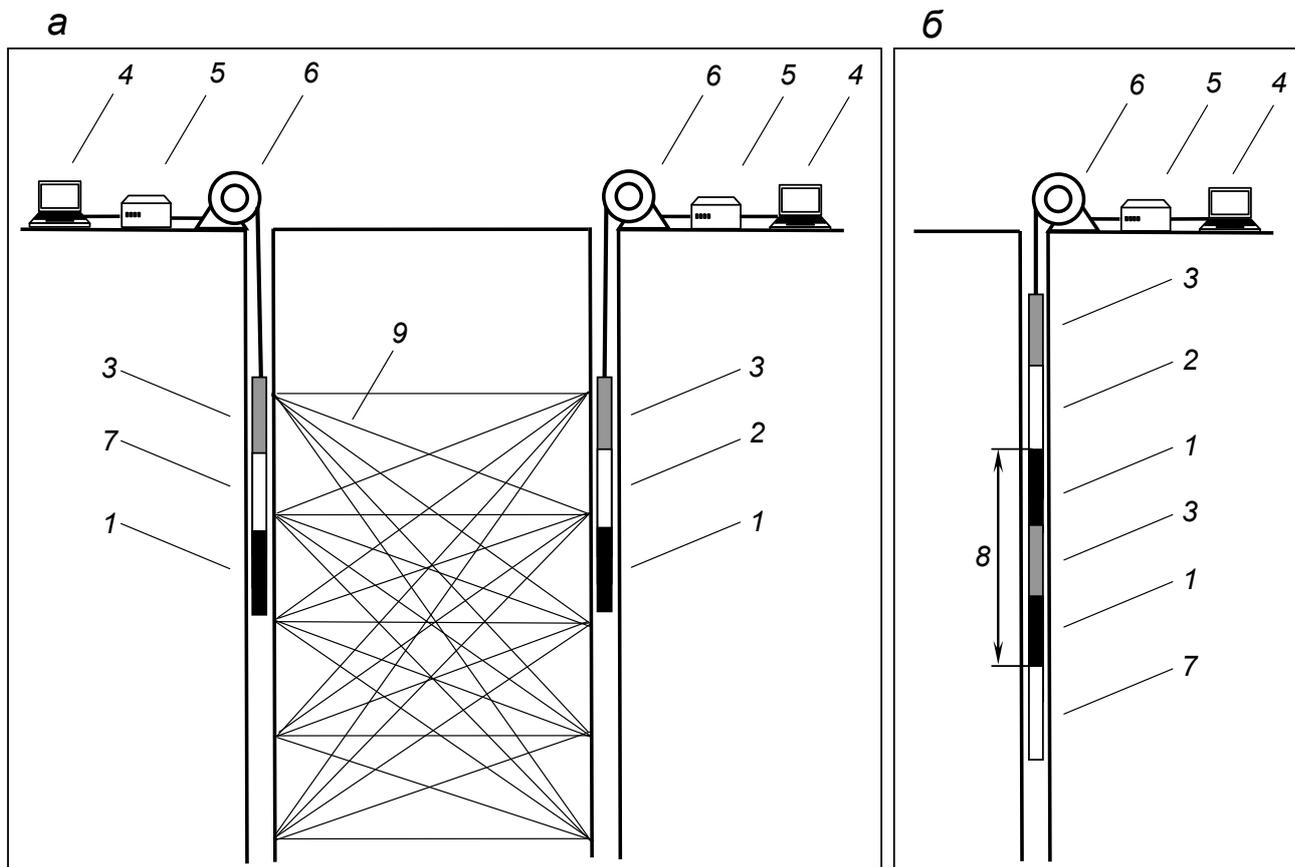


Рис. 1. Скважинные измерительные установки для радиоволновых измерений.

*а* – межскважинных (РВГИ); *б* – односкважинных (ОРВП).

1 – антенна; 2 – скважинный приемник; 3 – блок оптической развязки; 4 – компьютер; 5 – ретранслятор; 6 – каротажный подъемник; 7 – излучатель; 8 – разнос установки ОРВП; 9 – лучи просвечивания.

Ясно, что при измерениях в скважинах невозможно определение истинных  $\rho$  и  $\varepsilon$  реальных гетерогенных геологических сред, а только некоторая оценка их эффективных значений ( $\rho_{эф}$ ,  $\varepsilon_{эф}$ ), зависящих от многих факторов: размера установки, мощности пласта и контрастности его границ, литологических, структурно-текстурных характеристик, пористости, глинистости и других свойств, как флюидовмещающих пород (матрицы), так и от свойств и объемного содержания флюида.

Поглощение  $k''$  определяются не только породами, находящимися на трассе луча просвечивания, но и электрическими свойствами среды в пределах зоны, существенной для распространения радиоволны (первой зоны Френеля). Интегральные значения  $k''$  называются кажущимися коэффициентами поглощения. Эта зона имеет форму эллипсоида с осью, совпадающей с лучом просвечивания и диаметром, определяемым выражением:

$$d_f = \sqrt{\left[ \frac{2\lambda r(R-r)}{R} + \frac{\lambda^2}{4} \right] \left( 1 + \frac{\lambda}{2R} \right)^{-1}} \quad (3)$$

где  $R$  (м) – расстояние между излучателем и;

$r$  (м) – расстояние от излучателя до точки, в которой определяется  $d_f$ ;

$\lambda$  (м) – длина волны.

При среднем расстоянии между скважинами 35 м и крайне низком сопротивлении рабочего горизонта, достигнуть необходимой дальности просвечивания можно на частотах порядка 60-300 кГц. Для этих условий длина волны составляет 30 м, и волновая модель поля является справедливой.

Для межскважинных радиоволновых измерений на относительно низких частотах практически всегда справедливы условия квазипроводящей среды  $\rho\omega\varepsilon \ll 1$  и влиянием диэлектрической проницаемости в этом случае можно пренебречь:

$$k'' = \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu}{\rho}} \quad (4)$$

Схема соосной односкважинной установки с электрическими антеннами приведена на рис. 1б. Электромагнитное поле возбуждается электрическим переменным диполем, а в приемной электрической антенне измеряется напряжение, пропорциональное осевой компоненте поля.

В однородной изотропной среде осевую компоненту  $E_z$  электрического поля  $\mathbf{E}$  на оси переменного электрического диполя (элемента  $dl$  переменного тока  $I=I_0\exp(-i\omega t)$ ) в безграничной однородной немагнитной среде определяет следующее выражение:

$$E_z = \frac{Idl}{2\pi L^3} \cdot \frac{1}{\sigma - i\omega\varepsilon} \cdot (1 - ikL) \cdot \exp(ikL), \quad (5)$$

где  $L$  – расстояние от центра диполя до точки наблюдения;

$k$  (1/м) – волновое число;

$\varepsilon$  (Ф/м) – абсолютная диэлектрическая проницаемость.

*Геолого-технологические условия.*

Урановые месторождения, разрабатываемые методом ПВ, приурочены к пластовым водоносным горизонтам, залегающим на глубинах 100-700 м. Пригодные для вовлечения в

эксплуатацию залежи имеют выдержанные по латерали подстилающий и перекрывающий водоупоры. Ими могут являться глинистые отложения, монолитные плотные карбонаты, а так же интрузивные и изверженные породы, такие как граниты и базальты.

Содержание руды низкое, около 0.03-0.05 %. Наиболее простые и устойчивые формы залежей крупных размеров создаются в отложениях шельфа, морских отмелей и подводных течений, а так же в отложениях крупных аллювиальных равнин. Сложное строение залежей характерно для отложений средних и малых рек, в плане они имеют лентовидные, неправильной формы очертания.

Коэффициент фильтрации рудного горизонта изменяется в широких пределах от 0.1 м/сут у глинистых пород, до 15-30 м/сут у песчано-гравийных.

На основе анализа данных, полученных при разведке Далматовского уранового месторождения, а также опираясь на результаты исследований, послуживших основой данной работы, была составлена физико-геологическая модель рудного горизонта, а также геоэлектрическая модель самого процесса выщелачивания.

*Физико-геологическую модель* рудного горизонта до подачи окислителя можно представить как горизонтально-слоистую среду, представленную чередованием маломощных, невыдержанных по простиранию водопроницаемых и непроницаемых пропластков. Породы залежи относительно слабо дифференцированы по сопротивлению: максимальная электрическая контрастность водопроницаемых песков относительно непроницаемых глин составляет 4:1. Высокоомные песчано-гравийные отложения обладают сопротивлениями 25-50 Ом·м, а назкоомные пласты с преобладанием глинистого материала имеют сопротивления порядка 10-25 Ом·м. Сопротивление пластового флюида, равно как и сопротивление раствора скважины, может составлять 5-20 Ом·м. Сверху и снизу рудовмещающий горизонт ограничен мощными, выдержанными по латерали водоупорами, их сопротивление в зависимости от литологии варьирует от 10-25 Ом·м (глины, алевролиты) до десятков и сотен Ом·м (известняк, эффузивные породы, кристаллический фундамент).

Скважины оборудуются обсадными колоннами из непроводящего электрический ток полиэтилена. Гальванический контакт раствора скважины с породами наблюдается только в интервале фильтра.

При подаче в скважины крайне низкоомного раствора кислоты с сопротивлением 0.1-0.3 Ом·м, геоэлектрические условия в скважине резко меняются. В скважине образуется контрастная по электрическим свойствам граница кислотного раствора с полиэтиленовой обсадкой.

Можно ожидать, что при прокачке технологических растворов через рабочий горизонт фактически происходит замещение пластовой воды низкоомным флюидом, в результате чего сопротивление проницаемых песков должно снизиться в 5-10 раз до расчетных значений 3-5 Ом·м. Подобного замещения не должно произойти в непроницаемых глинистых породах и их сопротивление должно остаться на прежнем уровне (10-20 Ом·м). Таким образом, геоэлектрический разрез кардинально изменится: на фоне непроницаемых глин проницаемые песчаные породы будут проявляться пониженными сопротивлениями, причем степень снижения их электрического сопротивления будет определяться концентрацией кислоты в пласте.

**Во второй главе** приведены результаты теоретических исследований, касающиеся особых условий проведения радиоволновых исследований на месторождениях ПВ. Произведена оценка факторов, влияющих на односкважинные и межскважинные измерения радиоволновым методом. При этом использовались, как численные расчеты электромагнитных полей, так и методы физического моделирования.

Радиоволновые методы ОРВП и РВГИ были разработаны для исследования рудных месторождений в открытых стволах скважин, заполненных пресными растворами.

Теоретический анализ поля электрического диполя для установки ОРВП применительно к геоэлектрическим и технологическим условиям в скважинах ПВ урановых месторождений проведен совместно с кафедрой ЭГМ РГГРУ (Д.С. Даев, А.Д. Каринский). Расчеты проводились как по аналитическим формулам, так и с помощью численного моделирования методом конечных разностей для частот в диапазоне 1-31 МГц. Исследовалась задача о поле электрического диполя и поле электрического источника конечных размеров, находящегося на оси цилиндрической среды с коаксиальными границами раздела. Большая часть материалов получена для 4-х слойной модели среды. Внутренний слой (цилиндр) – модель изолирующей оболочки антенн, второй, третий и четвертый слои соответствуют скважине, полиэтиленовой обсадной колонне и однородным горным породам.

Расчеты для скважины без полиэтиленовой обсадной колонны, заполненной как пресным, так и соленым раствором, доказывают, что измерения на частотах 1 и 31 МГц позволят надежно определять электрические характеристики пород. Наличие полиэтиленовой колонны при пресном растворе скважины не вносит принципиальных изменений в зависимость величины  $|E_z|$  от  $\rho$  среды.

На рисунке 2 представлены результаты расчетов для четырехслойной модели скважины, заполненной низкоомным раствором – теоретические зависимости модуля

напряженности электромагнитного поля на частоте 1 МГц от  $\rho$  пород при различных разносах (рис. 2а), а также на частоте 31 МГц от  $\rho$  и  $\epsilon$  пород (рис. 2б).

Как видно на рис. 2а, при частоте 1 МГц наличие обсадной трубы и скважины с низким удельным электрическим сопротивлением приводит к резкому снижению чувствительности величины  $|E_z|$  к удельному электрическому сопротивлению пород. Эта зависимость может быть не монотонной.

При заполнении скважины соленым раствором, зависимости поля  $|E_z|$  от  $\rho$  и  $\epsilon$  пород на частоте 31 МГц (рис. 2а) остаются подобными аналогичным зависимостям для моделей с пресным раствором скважины.

На частоте 31 МГц присутствие полиэтиленовой обсадной трубы и конечные размеры излучающей и приемной антенн (АВ и MN) не оказывают значительного влияния на характер зависимостей измеряемой величины от значений электрических параметров пород.

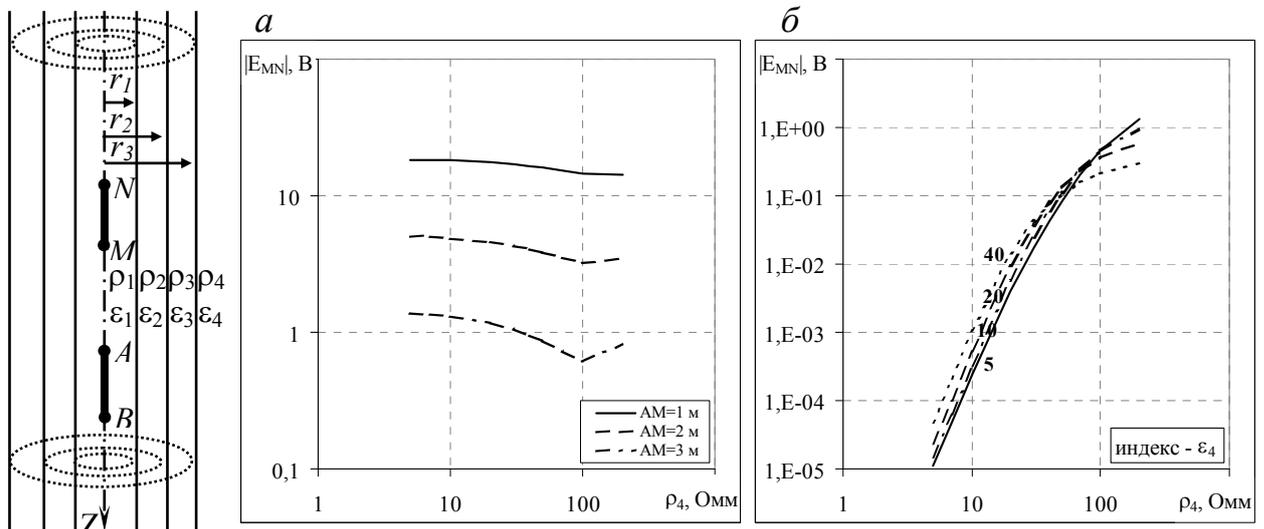


Рис. 2. Теоретические зависимости напряженности электромагнитного поля от  $\rho$  и  $\epsilon$  среды в обсаженной полиэтиленом скважине с раствором  $\rho_2 = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

а – 1 МГц (для  $\epsilon_4=10$ ); б – 31 МГц.

$I=1\text{ А}$ ,  $AM = 2 \text{ м}$ ,  $AB=MN=0.7 \text{ м}$ ;  $r_1=0.8 \text{ см}$ ,  $r_2=3 \text{ см}$ ,  $r_3=4 \text{ см}$ ;

$\rho_1=\rho_3=10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\epsilon_1=5$ ,  $\epsilon_2=80$ ,  $\epsilon_3=7$ .

Для односкважинных радиоволновых измерений практические следствия из результатов теоретического анализа могут быть сформулированы следующим образом:

1. В скважинах, обсаженных непроводящей полиэтиленовой колонной и заполненных хорошо проводящим раствором, измеренное поле на частотах ниже 5 МГц не несет надежной информации об электрических свойствах пород окружающих скважину. Оно отражает преобладающее влияние поля токов текущих в проводящей скважине.

2. На частотах в десятки мегагерц сигнал в приемной антенне определяется в основном электрическими свойствами окружающих пород, а не токами в проводящем растворе скважины.

3. Для режимных наблюдений (мониторинга) в обсаженных полиэтиленом скважинах ПВ целесообразно использовать аппаратуру с рабочей частотой 31 МГц.

Для межскважинных радиоволновых измерений оценка влияния полиэтиленовой обсадной колонны и проводящего раствора было проведено с помощью физического моделирование в баке с электролитом.

Физическое моделирование проводилось в баке 2860x3000x3800 мм, заполненном соленым раствором с сопротивлением 3.2 Ом м. Измерения производились на частотах в диапазоне 1-31 МГц с учетом электродинамических критериев подобия.

$$\begin{aligned} k'_n \cdot R_n &= k'_m \cdot R_m \\ k''_n \cdot R_n &= k''_m \cdot R_m \end{aligned} \quad (6)$$

Для моделирования влияния условий скважин ПВ на результаты межскважинных измерений антенна излучателя была помещена в герметичную полиэтиленовую трубу, которая поочередно заполнялась воздухом и проводящими соевыми растворами с сопротивлением 0.1, 1.0 и 5.0 Ом·м.

По результатам моделирования (рисунок 3) установлено, что в рабочем диапазоне углов просвечивания влияние полиэтиленовой колонны на межскважинные измерения заключается в линейном изменении уровня поля. При обработке этот эффект можно учесть, пропорционально изменив коэффициент установки.

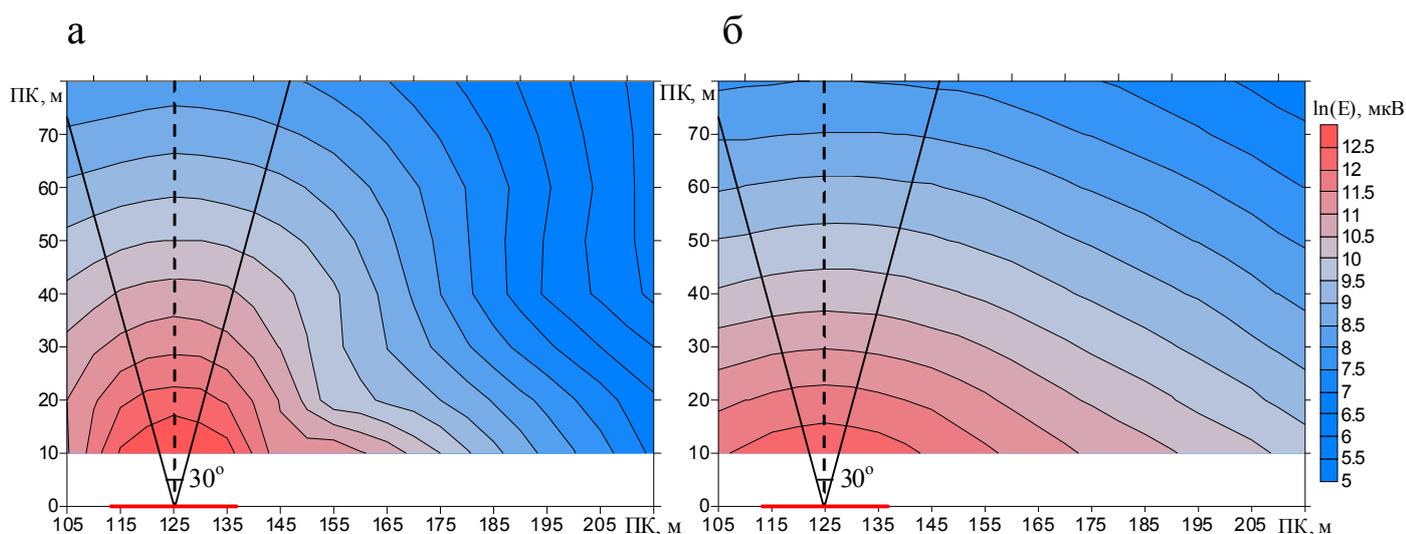


Рис. 3. а) нормальное поле  $E_z$  на частоте 18 МГц;  
 б) поле  $E_z$  на частоте 18 МГц в присутствии полиэтиленовой трубы с раствором 0,1 Ом·м. Расстояния отложены в см.

*Влияние перфорации* на односкважинные измерения выяснялось моделированием геоэлектрической ситуации в реальном масштабе с реальными установками.

Моделирование проводилось рабочей установкой на двух частотах 1.25 и 31.0 МГц с разносами 1.6 м и 2.24 м, размещенными в перфорированной полиэтиленовой трубе. На отдельных интервалах отверстия перфорации перекрываются резиновыми пробками, образуя «неперфорированный участок». В процессе измерений «неперфорированный участок» последовательно перемещался вдоль разноса с шагом 10 см. Наличие неперфорированного интервала создает на частоте 1.25 МГц значительные положительные аномалии поля, интенсивность которых зависит от соотношения величины этого интервала к расстоянию между приемо-передающими антеннами: чем меньше величина неперфорированной части относительно разноса, тем слабее его влияние. Измерения на частоте 31 МГц показали, что перфорация не оказывает влияния на измеренное поле.

*Влияния проводимости раствора скважины* на результаты измерений ОРВП, было исследовано с помощью измерений в эталонной скважине, обсаженной полиэтиленом.

В скважине производили измерения при наполнении различными по удельному электрическому сопротивлению растворами – 0.3, 1.0 и 28 Ом·м.

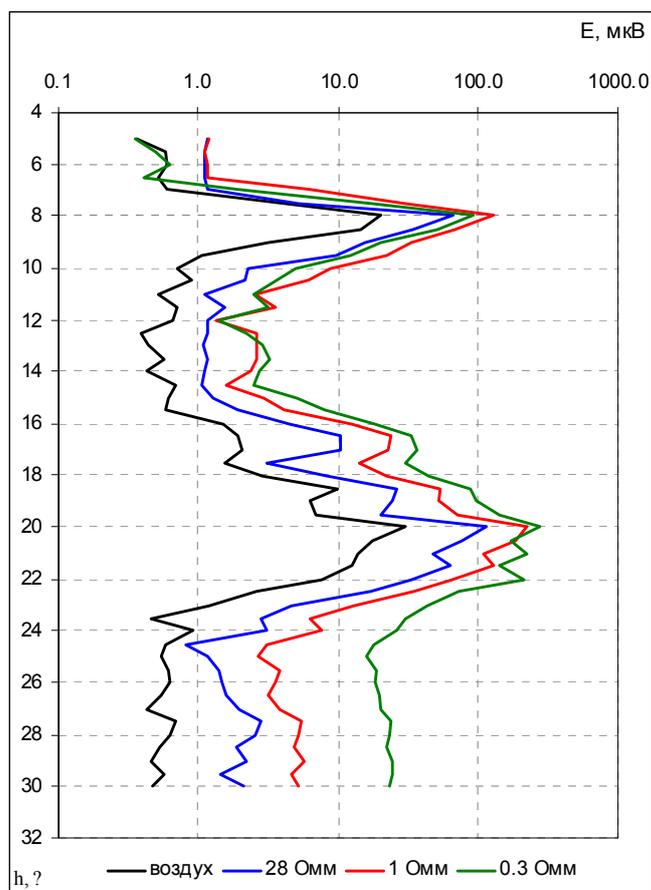


Рис. 4. Зависимость измеренного поля на частоте 31 МГц от сопротивления раствора скважины  $\rho_c$ .

В результате проведенных исследований подтвердились выводы, сделанные на основе теоретического анализа: при заполнении скважины растворами различной электропроводимости, главным образом менялся лишь уровень записи, а форма графиков поля и градиент изменения значений сохранялись (рисунок 4). Это обстоятельство позволяет учесть влияние сопротивления раствора скважины введением соответствующей поправки в коэффициент установки.

В целом, результаты физического моделирования в совокупности с данными теоретического анализа и эксперимента позволили определить требования к скважинным измерительным установкам и положительно оценить перспективы применения радиоволнового метода для решения геолого-технологических задач на урановых месторождениях ПВ.

**В третьей главе** основное внимание уделено разработке методики исследований и выбору оптимальных скважинных установок, приведены характеристики современной радиоволновой аппаратуры, описаны алгоритмы обработки и интерпретации. Изложена последовательность проведения мониторинговых радиоволновых исследований на урановых месторождениях.

Основным условием применения межскважинного просвечивания при заданных параметрах сети скважин и электрических характеристиках среды является обеспечение необходимой эффективной дальности исследований. Под эффективной дальностью принимается максимально возможное расстояние между излучателем и приемником ( $R_{max}$ ), при котором уровень измеряемого сигнала на приемном устройстве ( $E_{min}$ ) в 3 раза превышает уровень его собственных шумов.

Для увеличения дальности имеется три возможных способа. Первый – снизить частоту излучаемого поля. Второй – уменьшить собственные шумы аппаратуры. И третий – увеличить аппаратный параметр установки  $E_0$ .

Наиболее эффективным средством увеличения дальности в условиях крайне низких сопротивлений пород (5 - 30 Ом·м), характерных для месторождений ПВ, является снижение рабочей частоты. Так, при неизменности параметров  $E_0$  и  $E_{min}$ , только снижение частоты в 3 раза принципиально позволяет увеличить дальность на 30-50 %.

Ограничением для снижения частоты является возможность применения при обработке волновой модели. Расчет и практика показывают, что при среднем сопротивлении пород менее 15 Ом·м даже на частоте 0.061 МГц на расстояниях  $R > 30$  м условие волновой области соблюдается.

Увеличение в 3 раза параметра  $E_0$  (равно как и снижение в 3 раза  $E_{min}$ ) на низких частотах 0.061-0.156 МГц увеличивает дальность в среднем на 15-17%. Сложность, однако, заключается в том, что при снижении рабочей частоты пропорционально снижается и параметр  $E_0$ . Кроме того, низкие частоты требуют удлинения антенн, и возникают трудности с их согласованием и получением необходимого уровня тока.

Повысить аппаратурный параметр установки  $E_0$ , согласно (2), возможно за счет увеличения длины антенн и мощности излучателя. Применение длинных антенн на объектах ПВ практически невозможно из-за небольшой мощности объектов исследования, составляющей первые метры. Поэтому, в аппаратуре РВГИ применен специальный блок, который на каждой стоянке излучателя в скважине автоматически согласует его с излучающей антенной, добиваясь резонансного увеличения тока на ее входе. Это стало возможным благодаря двустороннему обмену цифровой информацией между автономными скважинными приборами и управляющими компьютерами через оптико-волоконные развязки, размещенные в диэлектрических стеклопластиковых корпусах. Такое построение аппаратуры позволило с одной стороны практически исключить влияние антенного эффекта от кабеля, а с другой – осуществить дистанционное управление скважинными приборами.

В качестве критериев для оценки разрешающей способности межскважинного радиопросвечивания принято использовать минимальный размер уверенно выявляемой неоднородности  $D_{min}$  и точность локализации ее кромки  $\delta$ . Параметр  $D_{min}$  характеризует минимальный поперечный размер объекта, расположенного посередине расстояния между скважинами, который создает аномалию, уверенно выделяемую по результатам просвечивания. По результатам расчетов и физического моделирования известно, например, что абсолютно проводящая полоса отмечается падением поля в два раза, если ее ширина составляет  $D_{min} = 0.3 \cdot d_f$ . При этом точность локализации ее кромки не хуже  $\delta = 0.1 \cdot d_f$ . Результаты моделирования показали также, что при современной точности измерений эти критерии выполняются вплоть до минимальной электрической контрастности неоднородности по отношению к вмещающим породам  $\rho_n/\rho_{вп} \leq 1/2$ .

Надежность обследования межскважинного пространства в плане можно определить из анализа проекций зоны Френеля для каждого сечения на горизонтальную плоскость (рис. 5а). Рабочая частота просвечивания должна обеспечивать взаимное перекрытие зон Френеля в плане как минимум на 15 %.

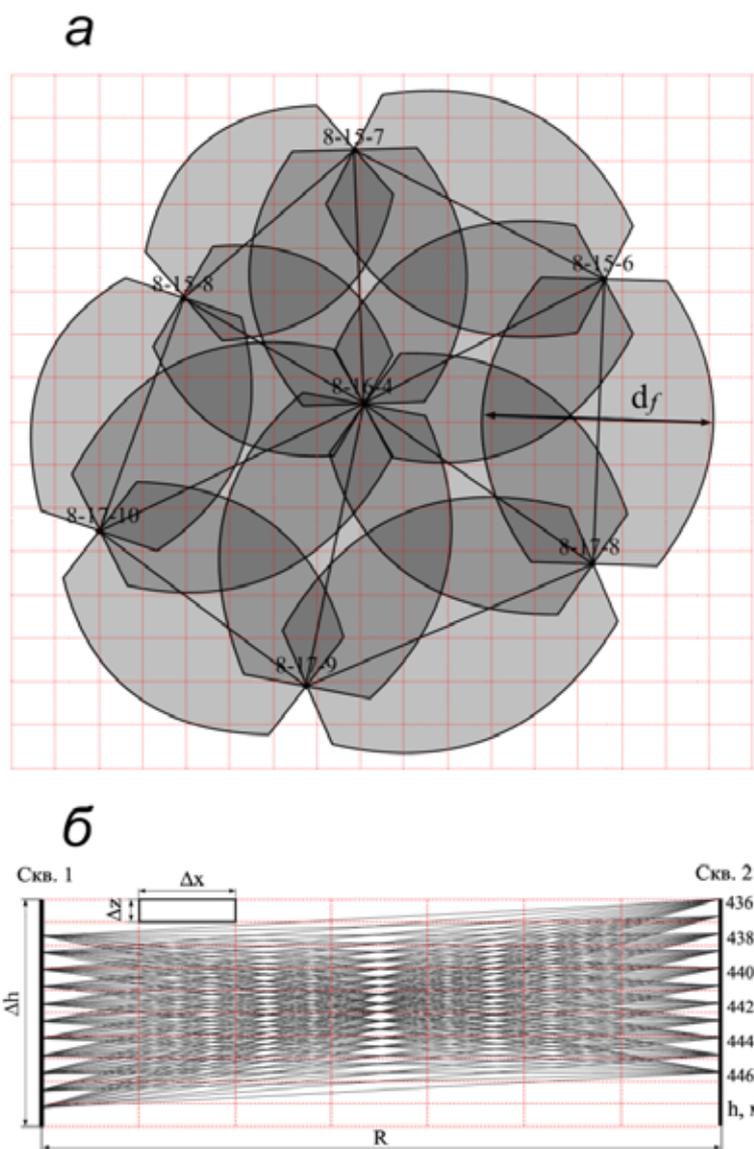


Рис. 5. К детальности межскважинных радиоволновых измерений.  
 а – в плане;  
 б – отдельном сечении.

Параметры  $f$ ,  $L_n$ ,  $R_{max}$ ,  $d_f$ ,  $D_{min}$  и  $\delta$  в совокупности составляют основные геотехнические характеристики радиоволнового метода, определяющие его возможности в конкретных условиях. Расчетные значения этих параметров для радиоволновых исследований с аппаратурой РВГИ-07 в геоэлектрических условиях месторождений ПВ приведены в таблице 1.

Значения  $d_f$  рассчитаны по формуле (3) для середины сечения с расстоянием между скважинами 40 м. Из таблицы видно, что в незакисленных песчаниках, характеризующихся электрическими сопротивлениями 20 - 30 Ом·м, при расстояниях между скважинами 40 м волновая модель поля справедлива на частотах 0.156 МГц и выше. Если, например, в результате закисления электрическое сопротивление пород снизилось с 30 до 15 Ом·м, то

повторные измерения РВГИ необходимо проводить на более низкой частоте, например, 0.061 МГц. Важно, что при этом разрешающая способность метода сохраняется, т.к. диаметр зоны Френеля на этих частотах до и после закисления практически одинаков.

Таблица 1.

Рабочая частота $f$ , (МГц)	УЭС среды $\rho_{\text{ср}}$ , (Ом·м)	Длина волны $\lambda$ , (м)	Диаметр зоны Френеля $d_f$ , (м)*	Минимальный размер неоднородности $D_{\text{min}}$ , (м)*	Точность локализации кромки $\delta$ , (м)*
0.061	30	70	37	11	4
	15	50	31	9	3
	5	29	24	7	2
0.156	30	44	30	9	3
	15	31	25	7	2
	5	18	19	6	2
0.312	30	31	25	7	2
	15	22	21	6	2
	5	13	16	5	2

Обработка данных межскважинных измерений начинается с приведения измеренной напряженности поля  $E_z$  к единым условиям излучения. Для этого в каждой точке приема во всех сечениях по всей площади значения измеренного поля нормируются на измеренные значения тока в антенне излучателя и вычисляется значение  $E_0$  по формуле (2). По измеренным значениям напряженности поля для каждого луча по формуле (1) рассчитывается кажущийся коэффициент поглощения  $k''_k$ .

Дальнейшая обработка данных РВГИ проводится способами томографического (2D) и волнового (3D) восстановления.

Построение геоэлектрических разрезов в отдельном сечении (2D) проводится с применением известного итерационного томографического алгоритма. В этом алгоритме пространство между скважинами разбивается на равные ячейки. Каждый луч (линия, соединяющая местоположения излучателя и приемника) просвечивания пересекает несколько ячеек. Определенный вдоль луча (длиной  $r$ ) кажущийся коэффициент поглощения  $k''_k$  считается равным сумме коэффициентов поглощений в пересекаемых ячейках  $k''_i$ . Вес вклада коэффициента поглощения отдельной ячейки в эту сумму пропорционален длине луча в пределах данной ячейки  $r_i$ :

$$k''_k = \sum k''_i h_i, \text{ где } h_i = \frac{r_i}{r} \quad (7)$$

Далее осуществляется поиск такого распределения  $k''$  по ячейкам, при котором рассчитанные по этой формуле коэффициенты поглощения по целым лучам просвечивания имеют минимальное расхождение с вычисленными по измеренному полю  $k''_k$ .

Критерием выбора оптимальных размеров элементарной ячейки является параметр  $d_f$ . Как показали результаты моделирования, оптимальные для томографической обработки размеры элементарной ячейки составляют  $0.1 - 0.2 d_f$ . При этом отношение размеров сторон ячейки должно быть пропорционально отношению расстояния между скважинами к длине интервала исследований  $R/L$  (рис. 5 б).

Коэффициент поглощения  $k''$ , традиционно используемый в качестве интерпретационного параметра, является частотно-зависимой величиной. Для сопоставления измерений на разных частотах более удобным параметром интерпретации является удельное электрическое сопротивление, которое вычисляется по формуле (4).

Томографические алгоритмы представляет собой решение двумерной обратной задачи в предположении, что на коэффициент поглощения вдоль луча влияют только пересекаемые им ячейки. Таким образом, они не решают в полной мере поставленной задачи, так как не учитывают влияние неоднородностей среды, расположенных в стороне от плоскости просвечивания.

Поэтому в ООО «Радионда LTD» разработан алгоритм 3D обработки данных РВГИ методом волнового восстановления (МВВ), который является усовершенствованием метода обратных проекций. В методе обратных проекций все пространство также разбивается на элементарные ячейки, в каждой из которых происходит осреднение кажущихся коэффициентов поглощения  $k''_k$  от всех лучей просвечивания с весами  $h_i$ , обратными расстояниям  $r_i$  от данной ячейки до оси соответствующего луча:

$$k''_i = \sum k''_{ki} h_i, \quad h_i = h(r_i) \quad (8)$$

Отличие этих алгоритмов заключается в том, что в волновом методе восстановления с помощью параметра  $d_f$  при осреднении учитываются кажущиеся коэффициенты поглощения только по тем лучам, в зоны Френеля которых попала конкретная элементарная ячейка. Кроме того, работы по физическому моделированию показали, что влияние периферийных ячеек  $h(r)$  убывает не обратно расстоянию, а может быть аппроксимировано законом нормального распределения, что также учитывается при расчете весовых коэффициентов:

Таким образом, метод волнового восстановления дает возможность физически обоснованно распространить результаты на весь объем исследованного пространства и провести совместную обработку данных измерений РВГИ, выполненных в нескольких не лежащих в одной плоскости сечениях.

Результатом такой обработки является объемная матрица расчетных значений эффективного электрического сопротивления, позволяющая построить 3D-геоэлектрическую карту всего исследованного блока.

Оба способа обработки являются приближенными и на практике дают достаточно близкие результаты. Если сравнивать геоэлектрические разрезы, полученные этими способами, то обычно геотомограмма является более дифференцированной и хорошо увязывается с односкважинными исследованиями. Алгоритм волнового восстановления дает более сглаженную картину, но позволяет выявить общие закономерности изменения электрического сопротивления в межскважинном пространстве.

При мониторинговых измерениях, для количественной оценки проникновения окислителя в породы может быть использован коэффициент закисления ( $K_3$ ), определяемый отношением:

$$K_3 = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (9)$$

где  $\rho_1$  – массив сопротивлений до закисления,

$\rho_2$  – массив сопротивлений после закисления.

На завершающем этапе обработки данных РВГИ строится 3-D карта параметра  $K_3$ , которая отражает растекание технологических растворов в межскважинном пространстве исследуемого массива.

Данные режимных наблюдений радиоволновым методом открывают принципиальную возможность для количественной оценки технологических параметров выщелачивания, например, для оценки средней концентрации кислоты в отдельных блоках закисленных пород. При относительно постоянном коэффициенте пористости пород  $K_p$  становится возможным использование электрического сопротивления для количественной оценки концентрации кислоты в породах.

Используя формулу Арчи, перейдем от сопротивления пород к сопротивлению технологического раствора.

Запишем формулу Арчи для исходного состояния рудного горизонта:

$$\frac{\rho_n}{\rho_\phi} = K_n^{-m}, \quad \text{где} \quad (10)$$

$\rho_n$  – удельное электрическое сопротивление пород по электрическому каротажу

$\rho_\phi$  – сопротивление порового флюида

$K_n$  – коэффициент пористости

$m$  – параметр, характеризующий структуру порового пространства.

После воздействия кислоты на породы соотношение запишем (9) в виде:

$$\frac{\rho_n^*}{\rho_\phi^*} = K_n^{-m},$$

где  $\rho_n^*$  и  $\rho_\phi^*$  – удельное электрическое пород и порового флюида после закисления

Если предположить, что структура порового пространства для каждого отдельного пласта остается неизменной, то правые части выражений равны и можно получить формулу для оценки сопротивления раствора в пласте:

$$\rho_\phi^* = \frac{\rho_n^* \cdot \rho_\phi}{\rho_n} = \frac{K_3}{\rho_\phi}. \quad (11)$$

Помимо самой серной кислоты, технологический раствор содержит и продукты реакции окислителя с вмещающими породами. Поэтому, рассчитав сопротивление технологического раствора, оценивается его общая минерализация, которая может быть выражена в эквивалентной концентрации серной кислоты, используя известную корреляционную зависимость.

*Технология применения объемного геологического картирования способом РВГИ (ОГК-РВГИ) на урановых месторождениях выбирается в соответствии с решаемыми задачами и зависит от технологии разработки месторождения.*

Межскважинные исследования способом РВГИ позволяют решать следующие задачи:

- **До подачи окислителя** проведение измерений повышает достоверность определения фильтрационных характеристик межскважинного пространства по сравнению с применяемой корреляцией данных каротажа между соседними скважинами. Это дает возможность выявлять и локализовывать в рабочем горизонте участки плотных и слабопроницаемых пород и повышать надежность подсчета извлекаемых запасов.
- Проводить детальное изучение геоэлектрического строения и оценку состояния горных пород надрудной толщи. Особенно актуальна эта задача для месторождений с невыдержанными водоупорами, либо со сложной тектоникой.
- **После подачи окислителя** радиоволновой метод позволяет изучать динамику его распределения в межскважинном пространстве. Это дает возможность оперативно обнаруживать целики пород, не вовлеченные в процесс выщелачивания, и своевременно изменять гидродинамическую схему процесса отработки.
- Выявление законтурных утечек технологического раствора и накопление его за пределами разрабатываемого блока. Задача решается с использованием наблюдательных скважин, находящихся вне периметра участка.
- Выявление и локализация возможных утечек технологических растворов в затрубное пространство.

Односкважинный вариант радиоволнового метода (ОРВП) позволяет:

- Производить количественную оценку распределение окислителя по рабочему горизонту в отдельных скважинах.
- Обнаруживать утечки технологических растворов в затрубное пространство и вышележащие горизонты.

Исследования по технологии ОГК-РВГИ с целью мониторинга процесса ПВ выполняются в следующей последовательности:

1. Проведение измерений в технологических скважинах до начала закисления исследуемого участка.

По результатам межскважинных исследований строится 3D-геоэлектрическая карта рудного горизонта (либо надрудной толщи), которая послужит базой сравнения для последующих мониторинговых измерений.

2. Проведение измерений через 2-3 недели после подачи окислителя в рабочий горизонт, когда процесс выщелачивания стабилизируется.

Производится построение 3D-карты параметра  $K_3$ , на основе анализа которой количественно оценивается распределение окислителя в межскважинном пространстве.

3. Проведение последующих режимных измерений (мониторинг) с интервалами 6-12 месяцев.

Сопоставляя объемные карты коэффициента закисления  $K_3$ , полученные на разных этапах разработки, составляется пространственно-временная модель распространения окислителя в межскважинном пространстве. В результате появляется возможность выявления непроработанных окислителем блоков пород, участков с высокой концентрацией кислотных растворов, а также вероятные направления утечек технологических растворов за контур участка.

Первые два этапа предваряются опытно-методическими работами, целью которых является уточнение методики и параметров измерительных установок для конкретных геолого-технологических условий.

При количественной обработке и интерпретации данных ОГК-РВГИ на всех этапах используются результаты резистивиметрии и индукционного каротажа, проведение которых предусмотрено стандартным комплексом геофизических исследований.

**В четвертой главе** приведены результаты применения технологии ОГК-РВГИ для мониторинга процесса выщелачивания на Далматовском и Хиагдинском урановых месторождениях ПВ.



На рисунке 6з приведен график коэффициента закисления ( $K_3$ ), а также диаграмма коэффициента фильтрации ( $K_f$ ), полученная пересчетом данных КС по корреляционной зависимости. Диаграммы  $K_3$  и  $K_f$  ведут себя идентично. Этот факт говорит о том, что предложенная геоэлектрическая модель закисления полностью согласуется с фильтрационной моделью, принятой на месторождении.

Распределение концентрации кислоты по скважине хорошо согласуется с графиками коэффициентов  $K_f$  (рис. 6з). Пластам с высокими содержаниями серной кислоты и значениями  $K_f$  соответствуют высокие значения коэффициента закисления, т.е. значительные изменения сопротивления, связанные с проникновением реагента, произошли в пластах с хорошими фильтрационными параметрами.

Аналогичные результаты получаются и при анализе данных ИК, однако, как видно на рисунках 38(а-в), диаграммы этого метода в данных геоэлектрических условиях имеют более сглаженный вид по сравнению с кривыми КС и ОРВП.

*Межскважинные радиоволновые исследования* закисленного блока проведены в 72 сечениях. По их результатам построена объемная 3D-геоэлектрическая карта эффективных сопротивлений.

На рисунке 7 представлен геоэлектрический разрез по данным РВГИ в сравнении с результатами измерений до закисления. Сопоставление разрезов также подтверждает модель закисления, согласно которой насыщение проницаемых песков проводящим раствором кислоты снижает их сопротивления ниже уровня глин. На рисунке отчетливо видно, что кислотные растворы в откачную скважину 1604 поступают в основном по проницаемому интервалу, расположенному непосредственно над промежуточным глинистым водоупором. Изменение геоэлектрического разреза хорошо согласуются и с односкважинными режимными измерениями – положительные аномалии параметра  $K_3$  совпадают с выделенными по данным РВГИ закисленными пластами.

На рисунке 8 представлена 3D-геоэлектрическая карта эффективных сопротивлений в виде горизонтального сечения по глубине 444 м

На горизонтальном сечении отчетливо проявлена определенная закономерность в распределении электрических свойств. В первую очередь следует выделить область минимальных сопротивлений в 4-6 Ом·м, расположенную в центральной части исследованного участка, протягивающуюся в направлении с северо-запада на юго-восток. Севернее и южнее этой области расположены участки относительно высокого сопротивления в 12-16 Ом·м. Принимая предложенную геоэлектрическую модель, полученное пространственное распределение электрического сопротивления пород можно

представить как объемную карту фактического закисления исследованного блока месторождения. В свою очередь, растекание кислотных растворов и наилучшее закисление происходит по наиболее проницаемым, хорошо фильтрующим породам, представленным песчано-гравийными отложениями. Наиболее вероятно, что выделенная область низких сопротивлений картирует русло палеореки.

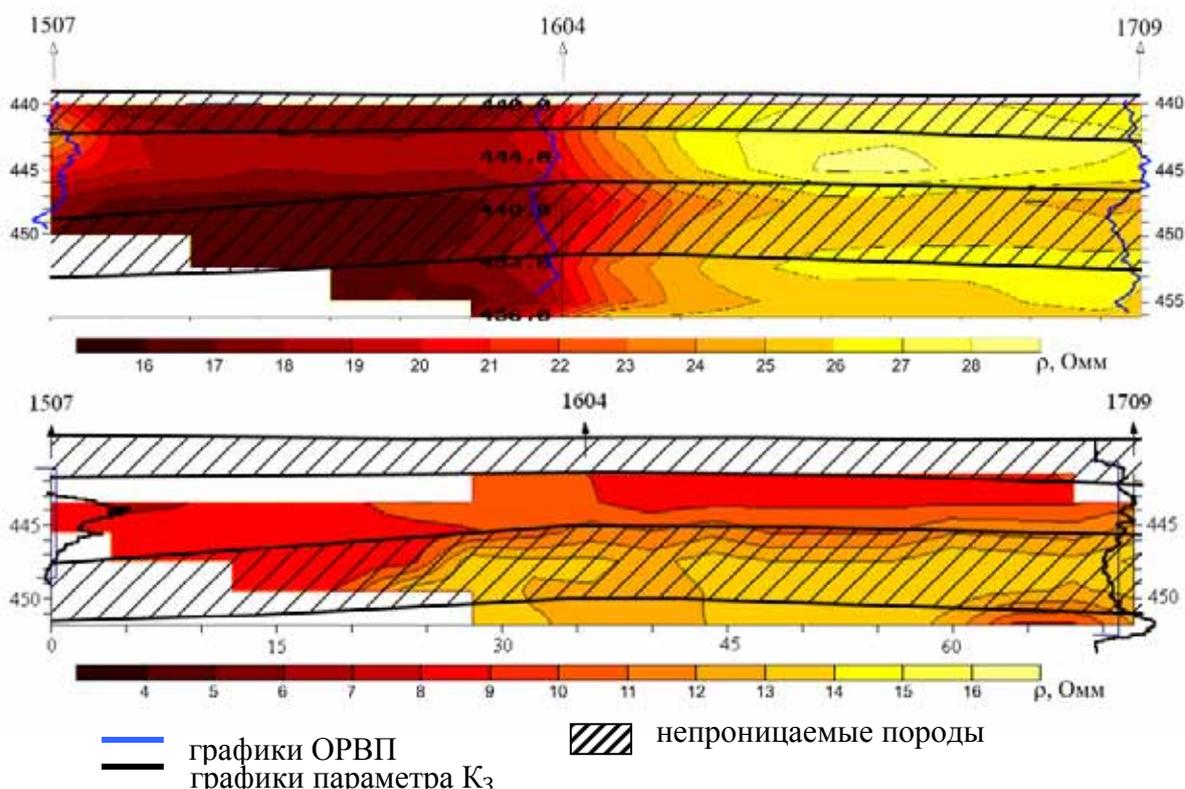


Рис. 07. Фрагмент 3D-геоэлектрической карты. Вертикальные сечения по линии скважин 15-7 – 17-9 до (вверху) и после (внизу) закисления, совмещенные с геологическим разрезом.

Количественная оценка распределения кислотного раствора в породах была выполнена в соответствии с методикой, описанной выше (изолинии концентраций кислоты выделены на рис. 8 цветом). Для участков пород с сопротивлением 5 Ом·м сопротивление технологического раствора составит около 0.5 Ом·м, что соответствует эквивалентной концентрации  $H_2SO_4$  не менее 8 г/л. Аналогично, эффективному сопротивлению пород в 10 Ом·м соответствует эквивалентное содержание кислоты менее 4 г/л. Полученные значения достаточно близки к имеющимся технологическим данным: максимальные концентрации в закачных скважинах составляют 16-20 г/л, в откачных – 2-4 г/л.

Геоэлектрическое картирование методом РВГИ дает осредненную характеристику объемной проницаемости межскважинного пространства и на 3D-карте проявляются основные морфологические особенности строения залежи и закономерности в технологии ее разработки.



выше линии скважин 61 – 63. Проникшие из этого участка технологические растворы уже проявились в электрических свойствах пород исследуемого блока. Такой вывод, сделанный еще на первой стадии радиоволновых исследований, нашел позже подтверждение в результатах технологического опробования скважин. Важно отметить, что это показывает возможность использования РВГИ в наблюдательных скважинах для контроля над растеканием технологических растворов в законтурное пространство. По данным повторных измерений, проведенных через год после интенсивной подачи кислоты в исследуемый блок, была получена геоэлектрическая карта, отражающая развитие во времени процесса пространственного распределения окислителя.

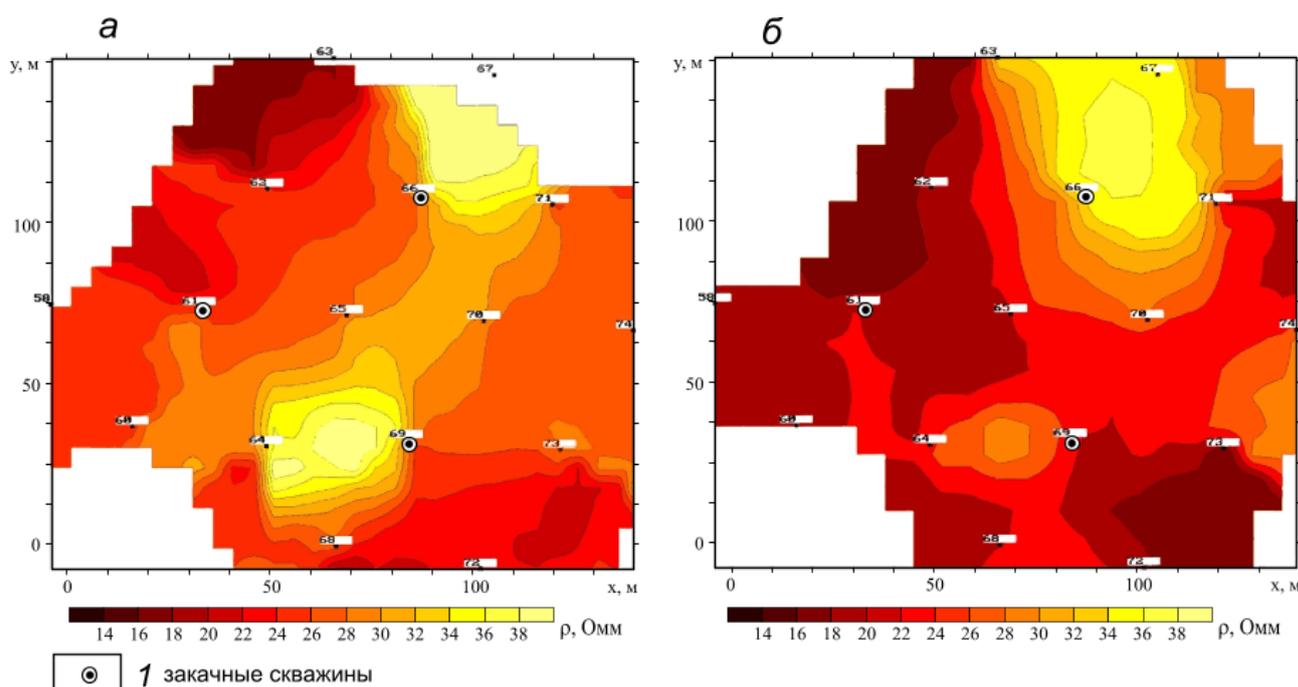


Рис. 09. Пространственно- временной мониторинг процесса закисления. Фрагменты 3D-геоэлектрической карты РВГИ. Горизонтальные срезы по интервалам фильтров. а – на начальной стадии закисления; б – через год после закисления.

Карта наглядно показывает, что процесс кислотной проработки блока проходит весьма неравномерно. На фоне общего снижения электрического сопротивления пород, связанного подачей окислителя, можно выделить участки, где ожидаемые изменения проявились крайне слабо. Так, в районе скважин 66, 67 и 71, выделяется участок, сопротивление которого мало изменилось после проработки блока в течение года. Это говорит о крайне низкой проницаемости пород участка, что подтвердилось в ходе эксплуатации этой ячейки. Скважины 67 и 71 отмечались низкими дебитами, практически не влияли на дебит ближайшей откачной скважины и позднее были выведены из эксплуатации.

Таким образом, результаты межскважинных радиоволновых исследований послужили обоснованием для прекращения неэффективной кислотной проработки этого участка.

В целом, результаты, полученные на Хиагдинском месторождении, являются первым практическим примером, показывающим возможности радиоволнового метода для мониторинга процесса скважинного подземного выщелачивания, как в межскважинном пространстве, так и во времени.

**В Заключении** сформулированы основные результаты исследований, выполненных по теме диссертации:

1. Результаты радиоволновых исследований РВГИ-ОРВП и ИК в скважинах до и после подачи окислителя подтвердили предложенную геоэлектрическую модель процесса закисления и возможность ее использования для геолого-технологической интерпретации данных просвечивания.

2. Результаты мониторинга установкой ОРВП позволяют характеризовать распространение окислителя в разрезе скважины и привязать результаты межскважинных измерений к конкретным интервалам. По данным ОРВП изменения электрических свойств пород в процессе закисления залежи можно представить в виде расчетного параметра

$K_3 = \frac{\rho_1}{\rho_2}$ , имеющего прямую корреляционную связь с фактической проницаемостью пород.

По мере накопления фактического материала, путем статистического анализа весьма вероятно определение количественной корреляционной связи этого параметра с коэффициентом фильтрации и разработки количественных критериев оценки проницаемости пород.

3. Оптимальным для каротажных электрометрических измерений в скважинах с целью мониторинга процесса выщелачивания является комплекс методов, включающий: ОРВП на частоте 31 МГц с разносами 2 -3.5 м; ИК и резистивиметрия.

4. Данные электрического каротажа КС в открытом стволе могут быть использованы в качестве основы для сравнения с данными ОРВП на частоте 31 МГц в колонне ПНД, выполненными после закисления месторождения.

5. Разработанная скважинная установка с контролируемым излучателем аппаратуры РВГИ-2007 обеспечивает требуемую эффективную дальность, точность измерений, чувствительность и разрешающую способность исследований для проведения мониторинга изменения электрических свойств во всем возможном диапазоне их изменения в процессе закисления залежи в условиях стандартной сети технологических скважин.

6. Рабочая частота межскважинного просвечивания после закисления должна быть снижена до 61 кГц, что обеспечивает требуемую эффективную дальность в 40-45 м и разрешающую способность метода, достаточную для решения поставленных задач.

7. Близкие значения геотехнических параметров РВГИ на частоте 312 кГц в среде со средним сопротивлением 25 Ом·м и на частоте 61 кГц в среде с сопротивлением 5 Ом·м позволяют использовать для оценки эффективности процесса закисления межскважинного пространства параметр  $K_3 = \frac{\rho_{312}^*}{\rho_{61}}$ , аналогичный примененному при обработке данных ОРВП и ИК.

8. При очевидной сильной литологической неоднородности пород, как по вертикали, так и по латерали без детального изучения межскважинного пространства невозможно надежно определить истинное пространственное распределения кислотных растворов и, следовательно, достоверно оценить эффективность отработки отдельных технологических ячеек.

9. Включение технологии ОГК-РВГИ в комплекс геофизических исследований позволяет получить новую по качеству информацию о литолого-физических характеристиках пород и их распределение в межскважинном пространстве, осуществлять оперативный контроль за процессом выщелачивания во времени и пространстве.

#### **Список опубликованных работ**

1. Колбенков А.В. Применение радиоволнового метода для мониторинга процесса ПВ на примере Далматовского уранового месторождения // Четвертая международная научно-практическая конференция "Инженерная и рудная геофизика", Геленжик, 2008, С. 61-62.

2. Колбенков А.В. О возможности контроля процесса подземного выщелачивания методами электрического и электромагнитного каротажа на примере Далматовского уранового месторождения // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, М., 2009., №2., С. 78-81.

3. Колбенков А.В. Результаты экспериментального опробования метода односкважинного радиоволнового профилирования (ОРВП) на урановом месторождении ПВ // Конференция РГГРУ «Молодые – наукам о Земле», Москва, 2006, С. 178.

4. Истратов В.А., Колбенков А.В., Лях Е.В., Перекалин С.О. Радиоволновой метод мониторинга технологических процессов в межскважинном пространстве // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2009 г., №2, Вып. 14., С. 59-68.