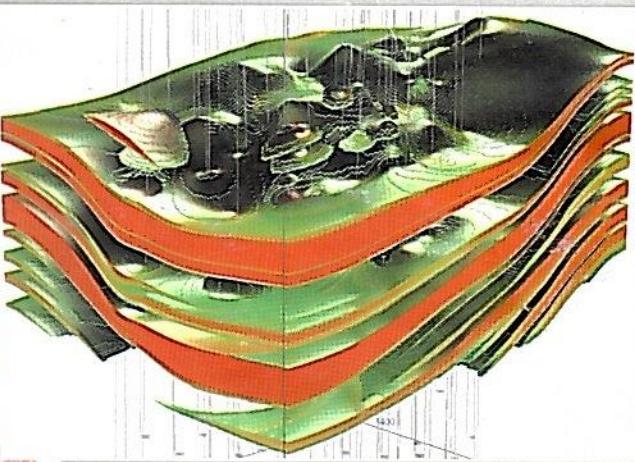


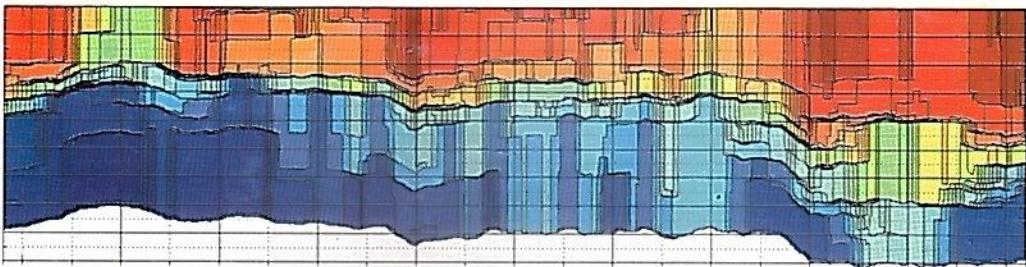
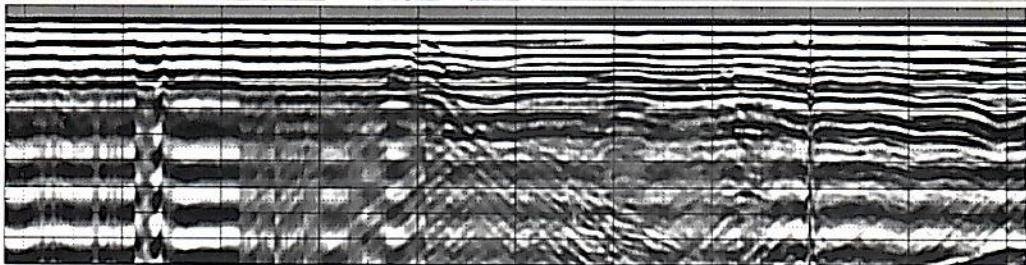
4.2010

Геофизика

Использование магнитометрии
в археологии



Трёхмерная модель распространения
биогермных известняков



Георадиолокационный профиль и разрез
диэлектрической проницаемости по нему

1

2

3

4

5

6



ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ
С 1993 ГОДА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ЕВРО-АЗИАТСКОЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
ГЕОТЕХИНФОРМЦЕНТР

4.2010
Геофизика

СОДЕРЖАНИЕ

П. С. Мартышко, А. Л. Рублев, В. А. Пьянков Применение метода локальных поправок для структурных задач магнитометрии	3
А. И. Кобрунов, Г. С. Жаркой О постановке и принципах решения обратных задач магнитотеллурического зондирования для сред с распределёнными параметрами	9
И. С. Гутман, И. Ю. Балабан, О. В. Постнова, С. А. Руднев, М. И. Саакян Программный комплекс ACDV для изучения осадконакопления в залежах углеводородов сложного геологического строения	17
С. И. Александров Пассивный сейсмический мониторинг. О методике сейсмоэмиссионной томографии	26
М. И. Рыскин, Е. Н. Волкова, К. Б. Сокулина, И. П. Соколова, И. А. Титаренко Комплексная интерпретация геофизических данных в зоне сопряжения Воронежской антеклизы с Рязано-Саратовским прогибом	31
В. М. Киселев, А. В. Чашков, А. Р. Кинсфатор Количественная оценка анизотропии проницаемости трещинных коллекторов со случайным распределением трещин	41
Б. В. Стерлигов, Л. А. Золотая, С. В. Черкасов, Ш. Гюмьё, Я. Чен, Д. Кассар Статистический анализ геолого-геофизических данных при прогнозе золоторудных зон Енисейского кряжа	47
В. А. Истратов, А. В. Колбенков, С. О. Перекалин, А. В. Скрипник Радиоволновой метод мониторинга процесса скважинного подземного выщелачивания на месторождениях урана	59
В. В. Носкевич, Н. В. Федорова, Л. А. Муравьев Использование магнитометрии при изучении археологических памятников эпохи бронзы на Южном Урале	69
Р. Р. Денисов, В. В. Капустин Обработка георадарных данных в автоматическом режиме	76

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР А.А. НИКИТИН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: Л.Д. Овчининская (зам. главного редактора),
А.М. Блюменцев (зам. главного редактора)

Б.Ю. Абрамов, И.А. Безрук, М.Л. Владов, Е.А. Давыдова, М.С. Денисов, Г.М. Золоева,
С.А. Кириллов, А.С. Лаврик, И.А. Мушин, В.И. Петерсилье, Е.Е. Поляков, С.Н. Птецов,
Б.С. Светов, С.А. Серкеров, В.П. Цирульников, Ю.К. Щукин

РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ЕАГО:
Л.Д. Овчининская - науч. и худож. редактор
Москва, 115191, 2-я Рощинская ул., д. 10
Тел.: (495) 952-47-15
Тел./факс: (495) 952-44-79
E-mail: eago_publish@mail.ru
Свидетельство о регистрации журнала
№ 0110923 от 21.07.93 г.
ISSN 1681-4568

"ИЗДАТЕЛЬСТВО ГЕРС": лицензия ЛР № 063997
В.Г. Зайцева, А.В. Титюченко - компьютерная верстка
Р.С. Калинина - набор. **Н.В. Царева** - корректор
170037, Тверь, ул. 2-я Лукина, д. 9
Тел.: (4822) 35-41-00
Факс: (4822) 35-41-00
Отпечатано в типографии "Издательство ГЕРС":
лицензия ПД № 5-0012
тираж 1300 экз.

РАДИОВОЛНОВОЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УРАНА

В. А. Истратов, А. В. Колбенков, С. О. Перекалин, А. В. Скринник

АННОТАЦИЯ. Эффективность добычи урана способом скважинного подземного выщелачивания (ПВ) в значительной мере зависит от качества проработки рудовмещающего пласта раствором реагента (окислителя). Выщелачивающие растворы, обладающие низким электрическим сопротивлением, прокачиваются через пласт по системе закачных и откачных скважин и заметно изменяют электрические характеристики вмещающих пород. Это создаёт предпосылки использования методов электrorазведки для контроля процесса закисления. Малый радиус действия методов электроракоротажа не обеспечивает получение надёжной информации о растекании окислителя в межскважинном пространстве. Обсадка скважин ПВ полиэтиленовыми (неметаллическими) трубами создаёт условия для решения этой задачи методом межскважинного радиоволнового просвечивания. Основным препятствием применению метода на урановых месторождениях ПВ до недавнего времени являлось низкое электрическое сопротивление песчано-глинистых водоносных пород рудоносного горизонта, не позволявшее стандартной аппаратурой получить необходимую дальность просвечивания, особенно после их закисления.

Разработанная в ООО "Радионда" скважинная аппаратура, методика 3D-обработки и технология объёмного геоэлектрического картирования межскважинного пространства способом радиоволновой геонтроскопии (РВГИ) позволили достичь требуемой дальности просвечивания при достаточно высокой разрешающей способности.

В настоящей статье приведены первые результаты экспериментального опробования технологии РВГИ на месторождениях урана для мониторинга процесса распространения окислителя в крайне низкоомной геоэлектрической обстановке. Кратко изложены физические основы метода, методика измерений и обработки.

Ключевые слова: уран, выщелачивание, радиоволновой метод, мониторинг.

ABSTRACT. Efficiency of the uranium development by means of subsurface leaching technique considerably depends on completeness of an oxidant spreading over ore bearing bed. The oxidant circulates through a pay bed by means of a system of injection and pumping wells. Due to its low resistivity it considerably changes electrical properties of bearing formations providing a precondition for using electromagnetic methods for monitoring of the oxidant spreading. Low coverage range of routine logging doesn't allow to obtain a reliable information about the oxidant spreading in an interwell space. Since polyethylene casing of wells doesn't shield the electromagnetic waves, a favorable environment is created for solving the problem by means of radiowave tomography. Until recently the very low resistivity of producing horizon prevented obtaining the necessary crosswell coverage and was considered to be the main barrier for applying this technique on the uranium ore fields.

ООО "Radionda" has developed a radio wave geointroscopy technique (RWGI) based on application of a new borehole tool, 3D processing procedure and geoelectrical mapping technology, that provided necessary crosswell coverage and sufficient resolution. The paper presents the results of experimental application of RWGI technology for monitoring of oxidant spreading in uranium ore fields with the very low resistivity environment. A physical base of the technique, procedure of measuring and processing, as well as field application are discussed.

Key words: uranium, leaching, radiowave, monitoring.

Введение

Добыча урана по технологии скважинного подземного выщелачивания (ПВ) является наиболее эффективным и экологически безопасным способом, позволяющим вовлечь в разработку относительно бедные месторождения, залегающие на глубоких горизонтах. Залежи, пригодные для эксплуатации, приурочены к водоносным горизонтам, представленным осадочными песчано-глинистыми породами, и обычно имеют выдержан-

ные по латерали подстилающий и перекрывающий водоупоры из плотных пород [9, 15].

При подземном выщелачивании в продуктивный пласт по системе скважин подаётся реагент (окислитель), который переводит соединения урана в растворимое состояние, что позволяет производить их откачуку для последующего обогащения. Сам продуктивный горизонт не однороден. Для геометризации запасов урана на месторождениях, разрабатываемых способом ПВ, необходимо не только оконтурить рудное тело по бор-

тому содержанию, но и выявить в нём проницаемые области, доступные для распространения окислителя.

Проницаемость продуктивного пласта ухудшается от присутствия в нем глинистого материала, наличие которого понижает электрическое сопротивление терригенных пород. Известные устойчивые корреляционные зависимости между глинистостью и удельным электрическим сопротивлением определили широкое применение методов электрокаротажа (в первую очередь КС) при разведке и обустройстве участков ПВ [9, 15]. Выщелачивающие растворы, обладающие низким электрическим сопротивлением, прокачиваются через пласт и заметно изменяют электрические характеристики вмещающих пород. Геоэлектрическую модель процесса разработки месторождений в первом приближении можно представить следующим образом:

- геологический разрез представляет собой горизонтально-слоистую среду, в которой проницаемые и не-проницаемые породы различаются по электрическим свойствам.
- процесс разработки заключается в замене природного флюида на технологический раствор, существенно отличающийся от первого по электрическому сопротивлению;
- в пластах, где технологический процесс протекает наиболее интенсивно, изменение электрических характеристик будет наиболее заметно, а на интервалах непроницаемых (например, глинистых) пород изменений не произойдет.

Таким образом, изменение электрических характеристик пород в процессе разработки создаёт предпосылки для их изучения с помощью электромагнитных методов.

Так как оборудование технологических скважин полимерными обсадными колоннами исключает повторное использование метода КС, то для решения эксплуатационных задач (например, выявления перетоков технологических растворов в затрубное пространство) применяется индукционный каротаж (ИК).

Практика показывает, что применяемый комплекс геофизических методов не в полной мере обеспечивает решение как разведочных, так и эксплуатационных задач. Недостатком методов каротажа является их малый радиус исследований, ограниченный областью, непосредственно прилегающей к стенке скважины. При сильной литологической неоднородности разреза, особенно характерной для речных палеодолин, надёжно определить изменчивость фильтрационных свойств и, соответственно, распределение кислотных растворов в межскважинном пространстве по данным каротажа затруднительно. Результат объёмной обработки данных каротажа в определяющей степени будет зависеть от выбранной модели и параметров интерполяции. Только для очень выдержаных разрезов этот результат будет соответствовать реальности, но его информационная ценность при этом минимальна.

Преодолеть вышеуказанные недостатки возможно, если дополнить применяемый комплекс межскважинными геофизическими исследованиями. Хорошими возможностями для этого обладает метод межскважинного ра-

диоволнового просвечивания, который был разработан во второй половине прошлого века для поисков и разведки хорошо проводящих руд в относительно высокомомых породах [4]. Обсадка скважин ПВ полимерными трубами не мешает прохождению радиоволн.

Основными причинами, не позволявшими до недавнего времени применить этот метод на урановых месторождениях ПВ, являлись: крайне низкое электрическое сопротивление пород рудоносного горизонта, при котором стандартной аппаратурой не удавалось получить необходимую дальность просвечивания; большие размеры скважинных установок (12 - 24 м), превышающие мощность продуктивного горизонта, не обеспечивали достаточной разрешающей способности исследований; резкое изменение геоэлектрических условий в скважине до и после закисления.

Способы интерпретации данных радиоволнового просвечивания были нацелены не на изучение распределения электрического сопротивления в межскважинном пространстве (геоэлектрическое картирование), а на выявление локального электрически сильно контрастного объекта [1, 11], отсутствовала методика совместной обработки данных радиопросвечивания по большому числу пар скважин.

Преодолеть эти препятствия оказалось возможным с помощью технологии радиоволновой геоинтроскопии (РВГИ), созданной в развитие радиоволнового метода в ООО "Радионда" [17].

Технология радиоволновой геоинтроскопии (РВГИ)

Метод радиоволнового просвечивания межскважинного пространства основан на изучении интенсивности поглощения электромагнитных волн породами, расположенными на трассе их распространения. Теоретические основы радиоволнового метода наиболее полно изложены в монографии А. Д. Петровского [11]. Далее приведены только необходимые для полноты изложения основные зависимости и выражения.

Схема межскважинных измерений представлена на рис. 1, а. В скв. 1 размещают излучатель, нагруженный на изолированную электрическую антенну, а в скв. 2 - приёмник с антенной аналогичной конструкции. При фиксированном положении излучателя в скв. 1 по стволу соседней скважины измеряют амплитуду вертикальной компоненты электрического поля, после чего передатчик смешают на определённый шаг, и измерения повторяются. Многочисленное перекрытие лучей просвечивания по различным направлениям (томографическая съёмка) обеспечивает высокую детальность исследования межскважинного пространства.

Наилучшие условия для межскважинных исследований в горизонтально-слоистых средах создаются, когда измерения проводятся с электрическими антennами ($E_z E_z$). При этом поглощение определяется в основном поперечным (более высоким) сопротивлением пород.

Амплитуда сигнала в точке измерения, пропорциональная напряжённости электрической компоненты поля в волновой области (при условии малости радиальной составляющей), для однородной среды опреде-

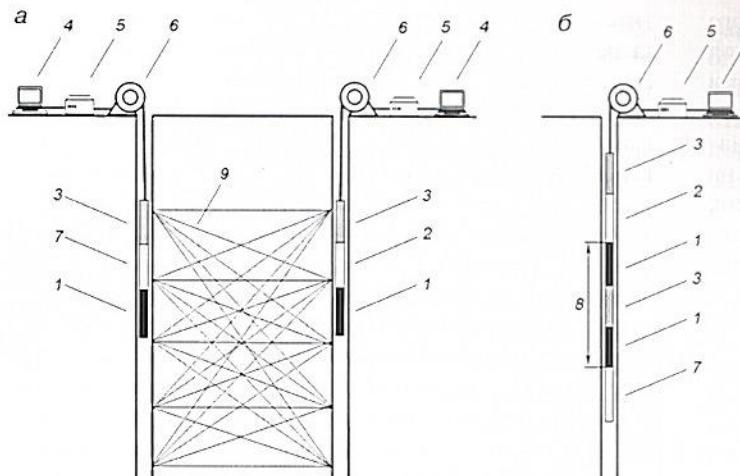


Рис. 1. Скважинные измерительные установки для радиоволновых исследований:

а - межскважинных (РВГИ); б - односекважинных (ОРВП); 1 - антенна; 2 - скважинный приёмник; 3 - блок оптической развязки; 4 - компьютер; 5 - ретранслятор; 6 - картажный подъёмник; 7 - излучатель; 8 - разнос установки ОРВП; 9 - лучи просвечивания

ляется выражением [11]:

$$E = \frac{E_0}{R} e^{-k'' R} F(\theta), \quad (1)$$

где E_0 - аппаратурный параметр, мкВ·м; R - расстояние между пунктами излучения и приёма, м; $F(\theta)$ - функция, учитывающая взаимную ориентировку излучающего и приёмного диполей в пространстве ($F = 1$, когда экваториальные плоскости антенн совпадают); k'' - коэффициент поглощения, м^{-1} .

Аппаратурный параметр установки $E_z E_z$ выражается формулой:

$$E_0 = \frac{I I_u l_u f \mu \cdot 10^6}{2}, \quad (2)$$

где I - ток в излучающей антенне, А; l_u , l_n - действующая длина, соответственно излучающей и приёмной антенн, м; f - частота электромагнитного поля, Гц; μ - магнитная проницаемость среды, в немагнитных породах $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м.

В радиоволновом просвечивании используются частоты, удовлетворяющие условию волновой зоны $2\pi R/\lambda > 1$, где λ - длина волны в породах. В условиях низкоомных разрезов, характерных для гидрогенных месторождений урана, для повышения дальности применяют низкие частоты, при которых токами смещения можно пренебречь: $r\omega \ll 1$. При этом коэффициент поглощения и длина волны будут определяться удельным электрическим сопротивлением пород (ρ , Ом·м):

$$k'' = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\rho}} \quad \text{и} \quad \lambda = 2 \sqrt{\frac{\pi \rho}{f \mu}}. \quad (3)$$

Зная геометрию расположения приборов и коэффициент измерительной установки, нетрудно для каждого луча по формуле (1) для однородной среды пересчи-

тать измеренные амплитуды поля в коэффициенты поглощения. При измерениях в неоднородных средах эти значения будут характеризовать кажущийся коэффициент поглощения k''_k , который является интегральной величиной, суммирующей все локальные изменения поглащающих свойств пород вдоль луча просвечивания, а точнее, в области, существенной для распространения радиоволн (первой зоне Френеля). Эта зона имеет форму эллипсоида с осью, совпадающей с лучом просвечивания, и с фокусами в точках излучения и приёма. Наибольший диаметр поперечного сечения зоны Френеля на середине расстояния между фокусами определяется выражением [13]:

$$d_f = \sqrt{\frac{\lambda R}{2}}. \quad (4)$$

Таким образом, параметр d_f определяет геометрические границы области исследованного пространства при каждом конкретном положении приёмо-передающих устройств. Все неоднородности среды, расположенные в пределах этой области, будут оказывать влияние на измеренное поле.

Основным условием применения межскважинного просвечивания при заданной сети скважин и электрических характеристиках среды является обеспечение необходимой эффективной дальности исследований. Под эффективной дальностью будем понимать максимально возможное расстояние между излучателем и приёмником (R_{\max}), при котором уровень измеряемого сигнала на приёмном устройстве (E_{\min}) в 3 раза превышает уровень его собственных шумов. Зависимость R_{\max} от технических параметров аппаратуры (диапазона рабочих частот, чувствительности приёмного канала и мощности излучателя) удобно показать на традиционной для радиопросвечивания диаграмме зависимости величины произведения ER от расстояния R , построенной в полулогарифмическом масштабе (рис. 2). В этих координатах график ER , выражющий формулу (1),

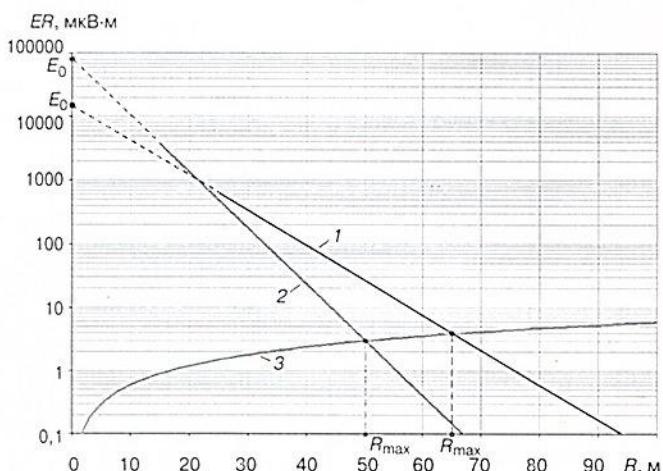


Рис. 2. К определению максимальной эффективной дальности просвечивания:
1 - $f = 0,061$ МГц; 2 - $f = 0,156$ МГц; 3 - $E_{\min} R_{\max}$

представляет собой прямую линию. Пересечение этого графика с осью ординат определяет величину E_0 , а угол наклона к оси абсцисс является функцией k' и, при фиксированном сопротивлении среды, зависит от частоты. Если в этих же осях на диаграмме построить аналогичный график чувствительности, умноженной на расстояние ($E_{\min} R$), то абсцисса точки пересечения этих двух графиков и будет определять максимальную эффективную дальность метода в данной среде R_{\max} . Для того чтобы увеличить дальность, т. е. сместить абсциссу точки пересечения графиков в сторону больших значений R , имеется три возможных способа. Первый - уменьшить угол наклона графика ER , снизив частоту излучаемого поля. Второй - опустить график $E_{\min} R$, уменьшив собственные шумы аппаратуры. И третий - поднять график ER , увеличив аппаратурный параметр установки.

Наиболее эффективным средством увеличения дальности в условиях крайне низких сопротивлений пород (5 - 30 Ом·м) является снижение рабочей частоты. Целесообразность применения относительно низких частот излучаемого поля для достижения необходимой дальности просвечивания в породах пониженного сопротивления была впервые показана в работах Г. Ф. Гуревича [3, 12]. Так, при неизменности параметров E_0 и E_{\min} , только снижение частоты в 3 раза принципиально позволяет увеличить дальность на 30 - 50%. Увеличение параметра E_0 в 3 раза (равно как и снижение в 3 раза E_{\min}) на частотах 0,061 - 0,156 МГц увеличивает дальность в среднем на 15 - 17%. Сложность, однако, заключается в том, что при снижении рабочей частоты пропорционально уменьшается и параметр E_0 . Кроме того, низкие частоты требуют удлинения антенн, и возникают трудности с их согласованием и получением необходимого уровня тока в излучателе.

Для исследований на урановых месторождениях был разработан вариант аппаратуры РВГИ-07 с частотами 0,03; 0,061; 0,156; 0,312 и 0,625 МГц, в которой в той или иной степени реализованы все три названные возможности.

Повысить аппаратурный параметр установки E_0 , согласно (2), возможно за счёт увеличения длины антенн и мощности излучателя. Применение длинных

антенн на объектах ПВ практически невозможно из-за небольшой мощности объектов исследования, составляющей первые метры. Большая длина антенн снижает разрешающую способность метода. Поэтому в аппаратуре РВГИ применён специальный блок, который на каждой стоянке излучателя в скважине автоматически соглашает его с короткой излучающей антенной, добиваясь резонансного увеличения тока на её входе до значений 0,2 - 0,5 А. Это стало возможным благодаря двустороннему обмену цифровой информацией между автономными скважинными приборами и управляющими компьютерами через оптико-волоконные развязки, размещённые 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 [6].

Чувствительность аппаратуры (E_{\min}) определяется шириной полосы пропускания приёмного тракта. В аппаратуре РВГИ за счёт цифровой фильтрации удалось сузить полосу пропускания до 12 Гц и обеспечить чувствительность во всем диапазоне рабочих частот не хуже 0,06 мкВ, что на данном этапе развития электроники является практически предельным.

Скважинную аппаратуру в целом характеризует безразмерный множитель $L_n = E_0/E_{\min}$, который и называют коэффициентом измерительной установки. Приведённые в таблице значения L_n аппаратуры РВГИ-07, рассчитаны для объёмных излучающих и приёмных антенн минимальной длины $l = 2$ м при гарантированном токе в 0,2 А. Высокие коэффициенты установок ($2,5 \cdot 10^5$ - $4 \cdot 10^6$) обеспечивают требуемую дальность просвечивания, отвечают параметрам применяемых систем расположения скважин и позволяют проводить исследования межскважинного пространства на всех этапах разработки, в т. ч. и после закисления. Экспериментально полученная с аппаратурой РВГИ-07 фактическая дальность просвечивания на урановых месторождениях ПВ всегда соответствовала или незначительно превышала расчётные значения R_{\max} .

Геотехнические параметры ГВГИ

Рабочая частота, f , МГц	Коэффициент установки L_n	УЭС среды ρ_{cp} , Ом·м	Длина волны λ , м	Эффективная дальность, R_{\max} , м	Диаметр зоны Френеля d_f , м	Минимальный размер неоднородности D_{\min} , м	Точность локализации кромки δ , м
0,061	$2,5 \cdot 10^5$	30	70	90	37	11	4
		15	50	65	31	9	3
		5	29	40	24	7	2
0,156	$1,3 \cdot 10^6$	30	44	68	30	9	3
		15	31	50	25	7	2
		5	18	31	19	6	2
0,312	$3,9 \cdot 10^6$	30	31	55	25	7	2
		15	22	43	21	6	2
		5	13	25	16	5	2

Примечание. Параметры d_f , D_{\min} и δ рассчитаны для середины фиксированного расстояния между скважинами $R = 40$ м. Параметр L_n рассчитан для минимально коротких антенн $l = 2$ м.

Ограничением для снижения частоты является возможность применения при обработке волновой модели и снижение разрешающей способности метода. Расчёт и практика показывают, что при среднем сопротивлении пород менее $15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ даже на частоте $0,061 \text{ МГц}$ на расстояниях $R > 30 \text{ м}$ условие волновой области соблюдается.

В качестве критериев для оценки разрешающей способности радиопросвечивания принято использовать минимальный размер уверенно выявляемой неоднородности D_{\min} и точность локализации её кромки δ . По результатам расчётов и физического моделирования [5, 13] известно, например, что абсолютно проводящая полоса отмечается падением поля в два раза, если её ширина составляет $D_{\min} = 0,3d_f$. При этом точность локализации её кромки не хуже $\delta = 0,1d_f$. Возможность использования этих соотношений для слабоконтрастных неоднородностей изучена авторами на моделях конечного сопротивления, изготовленных из ионообменной плёнки. Результаты моделирования показали, что при современной точности измерений эти критерии выполняются вплоть до минимальной электрической контрастности неоднородности по отношению к вмещающим породам $\rho_h/\rho_{\text{вп}} \leq 1/2$.

Параметры f , L_n , R_{\max} , d_f , D_{\min} и δ в совокупности составляют основные геотехнические характеристики радиоволнового метода, определяющие его возможности в конкретных условиях. Расчётные значения этих параметров для радиоволновых исследований в геоэлектрических условиях месторождений ПВ приведены в таблице. Значения d_f рассчитаны по формуле (4) для расстояния между скважинами 40 м. В незакисленных песчаниках, характеризующихся электрическими сопротивлениями 20 - 30 $\text{Ом}\cdot\text{м}$, 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 $\text{Ом}\cdot\text{м}$, то повторные измерения РВГИ необходимо проводить на более низкой частоте, например, 0,061 МГц. При этом разрешающая способность метода сохраняется, так как диаметр зоны Френеля на этих частотах до и после закисления практически одинаков. Отметим также, что приведённые значения d_f , D_{\min} и δ рассчитаны для середины расстояния между скважинами и являются предельными. Получаемые на практике результаты всегда несколько лучше.

Обработка данных РВГИ проводится способами томографического (2D) и волнового (3D) восстановления. При отсутствии локальных "экранов", которые могут создавать аномалии дифракции большой интенсивности, геоэлектрический разрез гидрогенных месторождений урана можно представить как среду с малоконтрастными границами слоёв и плавно изменяющимися электрическими свойствами. Это создаёт предпосылки для использования формул, полученных для однородной среды, в алгоритмах томографического и волнового восстановления.

В этих алгоритмах пространство между скважинами разбивается на равные ячейки. 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 $R/\Delta h$ (рис. 3, б).

Обработка данных в отдельном сечении проводится с применением известного итерационного томографического алгоритма [10, 14], который представляет собой приближённое решение двумерной обратной задачи в предположении, что на коэффициент поглощения вдоль луча влияют только пересекаемые им ячейки. Каждый луч просвечивания (линия, соединяющая местоположения излучателя и приёмника) пересекает несколько ячеек. Определённый вдоль луча кажущийся коэффициент поглощения считается равным сумме коэффициентов поглощений в пересекаемых ячейках. Вес вклада коэффициента поглощения отдельной ячейки в эту сумму пропорционален длине луча в пределах данной ячейки. Многократное пересечение лучей, проходящих в разных направлениях, даёт возможность составить и решить систему уравнений и для каждой ячейки определить

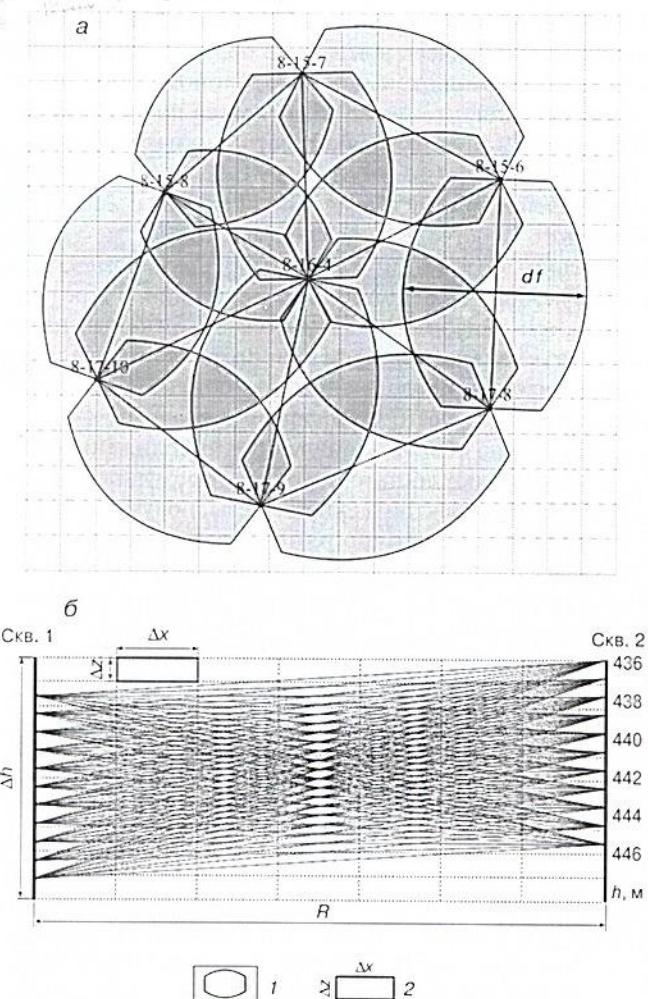


Рис. 3. Схема измерений РВГИ:
а - горизонтальная проекция; б - вертикальная проекция; 1 - проекции зон Френеля на горизонтальную плоскость; 2 - элементарная ячейка при томографической обработке

коэффициент поглощения, а значит, и эффективное электрическое сопротивление. При практическом опробовании известных томографических алгоритмов наилучшим образом проявил себя “одновременный итерационный метод восстановления” (ОИМВ).

Для совместной 3D-обработки данных РВГИ по всем сечениям исследованного участка применяется разработанный в ООО “Радионда” метод волнового восстановления (MBB), который учитывают влияние неоднородностей среды, расположенных в стороне от плоскости просвечивания. Этот алгоритм является усовершенствованием метода обратных проекций [14]. В методе обратных проекций всё пространство также разбивается на элементарные ячейки, в каждой из которых происходит осреднение кажущихся коэффициентов поглощения от всех лучей просвечивания с весами, обратными расстояниям от данной ячейки до оси соответствующего луча. 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, проведённые авторами работы по физическому моделированию показали, что влияние периферийных ячеек убывает не обратно расстоянию, а может быть аппроксимировано законом нормального распределения, что также учитывается при расчёте весовых коэффициентов. Таким образом, метод волнового восстановления даёт возможность физически обоснованно распространить результаты на весь объём исследованного пространства и провести совместную обработку данных измерений РВГИ, выполненных в нескольких не лежащих в одной плоскости сечениях. В результате такой обработки получается объёмная матрица расчётных значений эффективного электрического сопротивления, позволяющая построить 3D-геоэлектрическую карту всего исследованного блока.

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

До применения алгоритмов восстановления проводится детальный анализ данных по каждому сечению, целью которого является обнаружение и оценка возможных геологических и технологических помех. К геологическим помехам следует отнести возможное влияние отражённых волн от пластов-водоупоров и анизотропию пород. Для оценки влияния анизотропии электрических свойств пород по известной методике [2] вычисляется коэффициент анизотропии (k_t/k_n) и, при необходимости, данные измерений могут быть приведены к условиям изотропной среды.

В качестве интерпретационного параметра в радиопросвечивании обычно используется коэффициент

экранирования или коэффициент поглощения [11]. В нашем случае наиболее удобным параметром интерпретации является удельное электрическое сопротивление. Ясно, что при измерениях в скважинах невозможно определение истинных ρ , а только некоторая оценка их эффективных значений ($\rho_{\text{эфф}}$). Однако расчётные значения эффективного сопротивления позволяют количественно сопоставлять данные, полученные при измерениях на разных частотах и этапах радиоволновых исследований, увязывать их с данными каротажа и других методов электроразведки.

Задача объёмного геоэлектрического картирования предъявляет дополнительные требования к методике исследований: на каждом этапе исследований измерения по всему участку должны проводиться на одной рабочей частоте, которая должна обеспечивать кроме дальности и достаточное (15 - 20 %) взаимное перекрытие зон Френеля по соседним сечениям просвечивания (см. рис. 3, а); необходим постоянный контроль коэффициента измерительной установки; размеры излучающей и приёмной антенн должны быть идентичными и максимально короткими; шаг перемещения приборов должен быть одинаков по всему участку исследований и не превышать 2 м (см. рис. 3, а). Это обеспечивает максимальную детальность и накопление достаточного количества данных для выделения слабых аномалий.

Наиболее благоприятные условия для объёмного гекартования РВГИ возникают при равномерной треугольной (или гексагональной) сети скважин и длине интервала измерений в скважинах $\Delta h \geq R/4$.

Межскважинные измерения дополняются односекважинным радиоволновым профилированием (ОРВП), позволяющим увязать выделенные в межскважинном пространстве аномалии с разрезами по скважинам [8]. Схема измерений ОРВП изображена на рис. 1, б.

Результаты экспериментальных работ на разрабатываемых месторождениях

Экспериментальные работы по оценке возможностей технологии РВГИ в различных геоэлектрических и технологических условиях урановых месторождений ПВ проводятся ООО “Радионда” с 2003 г. Здесь кратко рассмотрим некоторые наиболее интересные результаты, полученные при опытно-производственных работах на известных Далматовском и Хиагдинском урановых месторождениях, отрабатываемых способом подземного выщелачивания.

Далматовское урановое месторождение (Курганская область) приурочено к отложениям речной палеодолины. Рудоносный горизонт представлен чередованием маломощных и невыдержаных по латерали пропластков песчано-гравийных и глинистых отложений. Удельное электрическое сопротивление пластовой воды 4 - 5 Ом·м. Выщелачивание проводится раствором серной кислоты, удельное электрическое сопротивление которого 0,3 - 1,0 Ом·м.

Блок разбурен по гексагональной сети с расстоянием между скважинами 30 - 40 м (каждая откачная скважина окружена шестью закачочными). Скважины обсажены технологической колонной из полиэтиленовых труб

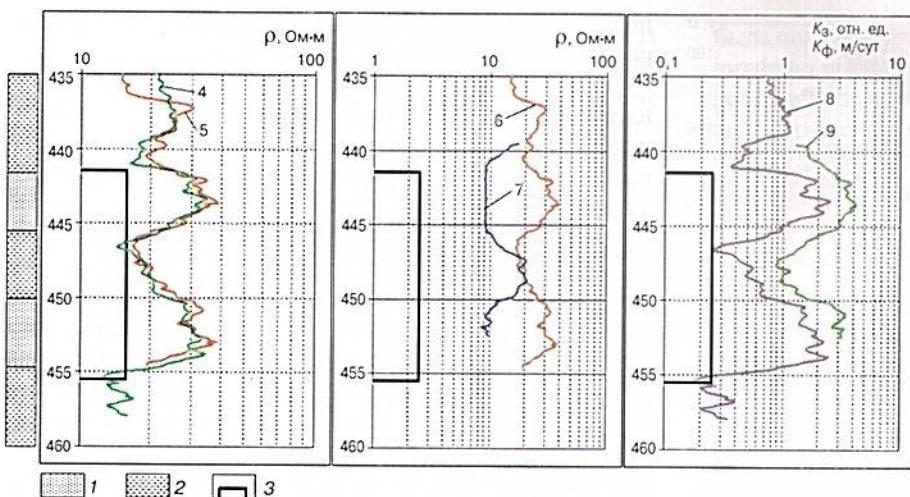


Рис. 4. Сопоставление каротажных диаграмм методов КС и ОРВП до и после закисления, Далматовское месторождение:

а - сопоставление диаграмм КС в открытом стволе и ОРВП в технологической колонне до закисления; б - сопоставление диаграмм ОРВП в технологической колонне до и после закисления; в - сопоставление параметров K_{ϕ} и K_3 : 1 - проницаемые породы; 2 - глинистые породы; 3 - интервал фильтра; графики: 4 - КС; 5 - ОРВП; 6 - ОРВП до закисления; 7 - ОРВП после закисления; 8 - коэффициент фильтрации K_{ϕ} по данным КС; 9 - коэффициент закисления K_3 по данным ОРВП

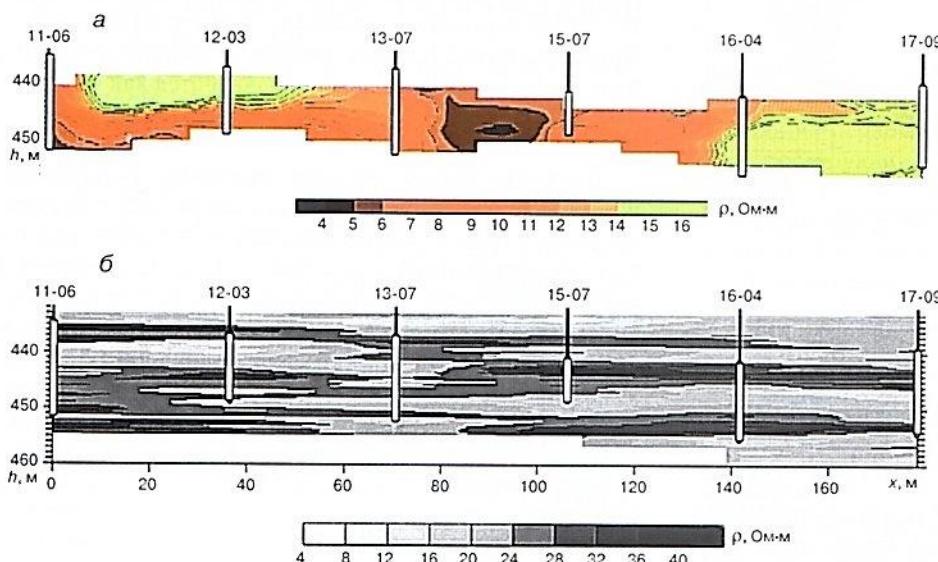


Рис. 5. Геоэлектрические разрезы по линии скв. 11-06 - 17-09, Далматовское месторождение:

а - фрагмент 3D-геоэлектрической карты по данным РВГИ в виде вертикального сечения; б - результат интерполяции данных каротажа КС

и в интервале продуктивного пласта на глубине около 440 м оборудованы фильтрами длиной 8 - 12 м.

Радиоволновые исследования были проведены в 51 скважине центральной части месторождения в вариантах односекционных и межскважинных измерений в два этапа - до подачи окислителя и через 8 месяцев после начала закисления.

Рассмотрим результаты ОРВП по одной из скважин. На рис. 4, а приведены два графика: ρ_K , построенный по данным каротажа открытого ствола методом КС с зондом 0,5 м, и график $\rho_{\text{эфф}}$ по данным ОРВП в технологической колонне с разносом 2,25 м на частоте 31 МГц. На обоих графиках в фильтровой части в интервале 446,5 - 450,5 м низкими сопротивлениями (< 24 Ом·м) отмечаются глины, а высокими (до 40 Ом·м) - пески и гравелиты. Хорошее совпадение каротажных диаграмм наглядно показывает, что данные КС вполне могут быть использованы как база сравнения при мониторинге процесса закисления методом ОРВП.

На рис. 4, б приведено сравнение двух графиков $\rho_{\text{эфф}}$, полученных по данным измерений ОРВП до и после закисления. Эффективное сопротивление слабопроницаемых глин, в которые не проникла кислота, осталось

неизменным - на уровне 20 Ом·м. Напротив, электрическое сопротивление проницаемых песков, ранее самых высокоомных, после замены пластового флюида раствором серной кислоты резко понизилось до 9 Ом·м, что заметно ниже уровня сопротивления глин. Таким образом, электрическое сопротивление пород после закисления определяется содержанием в них кислоты¹. Для количественной оценки закисления можно предложить параметр $K_3 = \rho_{n1}/\rho_{n2}$ (коэффициент закисления), где ρ_{n1}, ρ_{n2} - сопротивление пород до и после закисления. На рис. 4, в приведено сравнение коэффициента K_3 (по данным ОРВП) с коэффициентом фильтрации K_{ϕ} . Логично, что максимальное закисление наблюдается в наиболее проницаемых породах.

Межскважинные радиоволновые измерения проводились в пределах интервала фильтра на частоте

¹ На самом деле технологический раствор кроме серной кислоты содержит также и продукты её реакции с вмещающими породами. С точки зрения электрометрии химический состав раствора не будет иметь принципиального значения, т.к. его удельное сопротивление близко к сопротивлению раствора серной кислоты той же концентрации.

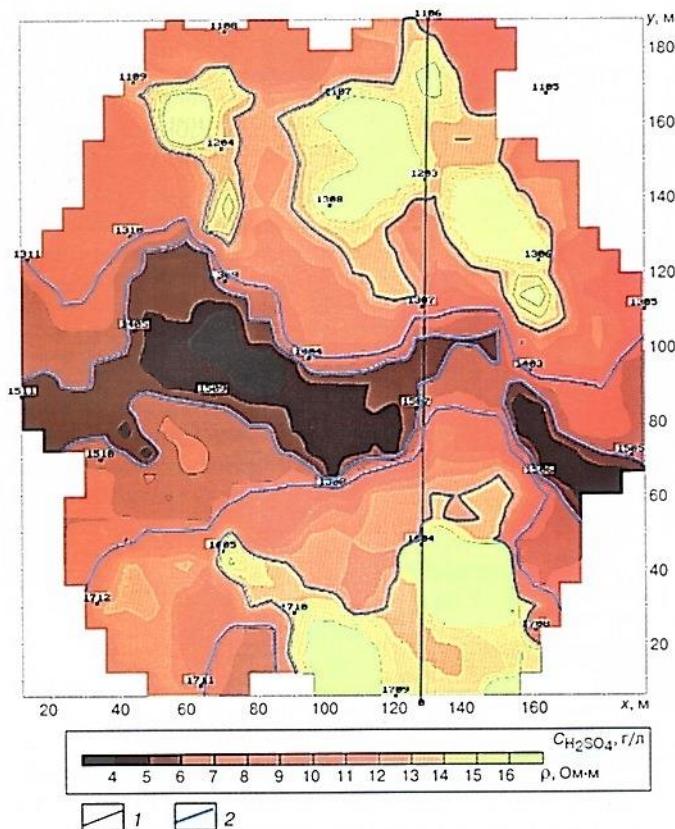


Рис. 6. Фрагмент 3D-геоэлектрической карты РВГИ. Горизонтальное сечение по глубине 444 м, Далматовское месторождение:

1 - линия разреза; 2 - изолинии концентрации раствора серной кислоты

0,061 МГц с антеннами длиной 5 м при шаге съёмки 2 м. Диаметр зон Френеля в средней части сечения составил около 20 м, что обеспечило их необходимое взаимное перекрытие (см. рис. 3, а).

По данным измерений РВГИ в 72 сечениях построена объёмная геоэлектрическая карта закисленного блока, фрагменты которой представлены в виде вертикального разреза по линии скважин 11-06 - 17-09 (рис. 5) и горизонтального сечения на глубине 444 м (рис. 6). Как вид-

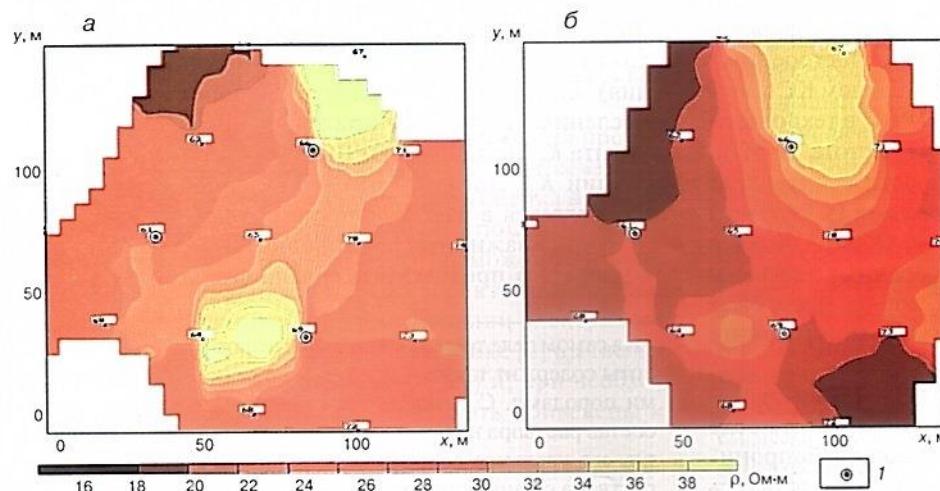
но на рис. 5, а, область низких сопротивлений (4 - 5 Ом·м) расположена между скв. 13-07 - 16-04.

На горизонтальном сечении (см. рис. 6) выделенная на разрезе область минимальных эффективных сопротивлений расположена в центральной части исследованного участка и протягивается в направлении с северо-запада на юго-восток. Участки, расположенные севернее и южнее этой области, имеют гораздо более высокие эффективные сопротивления (12 - 16 Ом·м).

Принимая за основу предложенную выше геоэлектрическую модель, полученное пространственное распределение электрического сопротивления пород можно представить как объёмную карту фактического закисления исследованного блока месторождения. В свою очередь, растекание кислотных растворов и наилучшее закисление проходят по наиболее проницаемым породам, представленным песчано-гравийными отложениями. Поэтому наиболее вероятно, что область низких сопротивлений картирует палеорусло. Сопоставление карты сопротивлений с технологическими данными показало, что в пределах этой области наблюдаются как наибольшие дебиты откачных скважин, так и наибольший выход металла.

Пользуясь формулой Арчи, принимая среднюю пористость продуктивного пласта равной 30% и используя связь электрического сопротивления серной кислоты с её концентрацией в растворе [7], можно получить оценку степени закисления областей различного сопротивления [8]. Так, на участках пород с $\rho_{\text{эфф}} = 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ сопротивление насыщающего поры пород флюида будет составлять около 0,5 Ом·м, что соответствует концентрации H₂SO₄ не менее 8 г/л. Аналогично, эффективному сопротивлению пород в 10 Ом·м будет соответствовать содержание кислоты более 4 г/л. Полученные расчётные значения достаточно близки к имеющимся фактическим технологическим данным. В соответствии с этими расчетами, на рис. 6 цветом выделены изолинии концентрации кислоты 2; 4 и 8 г/л.

Для сравнения результатов РВГИ и каротажа на рис. 5, б приведён геоэлектрический разрез, построенный способом интерполяции данных КС. Высокоомная зона между скв. 13-07 - 16-04, выделяемая по данным КС, должна соответствовать проницаемым породам. Как уже



отмечалось, на разрезе РВГИ (см. рис. 5, а) эта область действительно отмечается высокой степенью проработки. В скв. 11-06, 12-03 и 13-07 высокомонные пески по каротажу расположены на уровне нижней половины фильтров, что также подтверждается информацией о фактическом закислении по данным РВГИ. Иная ситуация наблюдается в пространстве между скважинами 16-04 и 17-09. Формальная интерполяция данных КС объединяет низкомонные интервалы на глубинах 442-446 м и 450-454 м в единые пласти, по которым должна осуществляться гидродинамическая связь между этими скважинами. Однако по данным РВГИ фактического закисления в межскважинном пространстве не произошло (см. рис. 5, а). Это показывает, что в условиях речных палеодолин формальной интерполяции электрокаротажа недостаточно, и объёмное геоэлектрическое картирование межскважинного пространства способом РГВИ может существенно повысить надёжность построения геологотехнологических разрезов.

Хиагдинское месторождение (Бурятия) также относится к месторождениям гидрогенного типа. Рудный горизонт залегает непосредственно на коре выветривания гранитов на глубине до 200 м, слагается ритмически построенным пачками руслово-пойменного аллювия субгоризонтального залегания с пластово-ленточной морфологией. Распределение проницаемых и непроницаемых разностей в рудовмещающих отложениях неравномерное и незакономерное. Сопротивление пород изменяется в диапазоне 15 - 70 Ом·м, при сопротивлении пластовых вод не менее 20 Ом·м.

Блоки разбурены по гексагональной сети с расстоянием между скважинами 35 м. Технологические скважины обсажены полиэтиленовыми трубами и в интервале продуктивного пласта оборудованы фильтрами длиной до 8 м.

В пределах фильтровой части исследуемого блока в два этапа были произведены измерения в 30-ти сечениях РВГИ. На первом этапе (в 2007 г.), до начала подземного выщелачивания измерения были проведены на частоте 0,156 МГц с антennами 2 м. Через год после начала интенсивного закисления блока (2008 г.) сопротивление пород в целом заметно понизилось, и измерения производились уже на частоте 0,061 МГц и антennами 5 м.

Построенные по результатам этих исследований геоэлектрические карты по глубине 160 м приведены на рис. 7, а, б. Ожидаемой инверсной картины не наблюдается. Это вызвано тем, что исследуемый блок вплотную примыкает к разрабатываемому в течение нескольких лет опытному участку ПВ, расположенному чуть выше линии скв. 61 - 63. Проникшие из этого участка технологические растворы уже проявились в электрических свойствах пород исследуемого блока. Такой вывод, сделанный ещё на первой стадии радиоволновых исследований, нашёл позже подтверждение в результатах технологического опробования скважин. Заметим, что это показывает возможность использования РВГИ в наблюдательных скважинах для контроля над растеканием технологических растворов в законтурное пространство. По данным повторных измерений, проведённых через год после интенсивной подачи кислоты в исследуемый блок,

была получена геоэлектрическая карта, отражающая развитие во времени процесса пространственного распределения окислителя. Сравнивая результаты 2007 и 2008 гг., можно сделать важные для практики выводы. Очевидно, что процесс кислотной проработки блока проходит весьма неравномерно. На фоне общего снижения электрического сопротивления пород, связанного с интенсивной подачей кислоты, можно выделить участки, где ожидаемые изменения проявились крайне слабо. Так, в районе скв. 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 и результатами последующей эксплуатации этой ячейки. Скв. 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 отличие от этого, другая высокомонная зона, выделенная на первом этапе между скв. 64 и 69, как показали последующие измерения, заметно изменила свои размеры и электрические характеристики. Через год сопротивление пород понизилось в 1,5 - 2 раза, что говорит об их постепенной проработке кислотой.

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.

Заключение

В практике геофизических исследований на урановых месторождениях ПВ представленный выше материал получен впервые. Экспериментальные радиоволновые исследования выполнены в достаточно большом объёме на двух урановых месторождениях и на разных стадиях их разработки, что позволяет сделать основные выводы.

□ Радиоволновые измерения, проведённые до и после подачи кислотных растворов, подтвердили геоэлектрическую модель процесса закисления рудного пласта. Действительно, проницаемые песчано-глинистые отложения, в которые проникли выщелачивающие растворы, снизили своё первоначальное сопротивление ниже значений, характерных для глин. При этом электрическое сопротивление глинистых пород практически не изменилось. Высокая электропроводность растворов кислоты оказалась определяющим фактором, характеризующим сопротивление участков закисленных пород. Это позволяет использовать рассчитанные по данным РВГИ значения эффективного сопротивления для оценки степени закисления различных участков, а также для выявления и оконтуривания блоков плотных пород, кислотная проработка которых малозэффективна.

□ Разработанная скважинная радиоволновая аппаратура позволила реализовать эффективную дальность просвечивания, необходимую для стандартных сетей технологических скважин. Точность измерений и раз-

решающая способность исследований по методике РВГИ вполне достаточны для оценки электрических характеристик пород в широком диапазоне их изменения в процессе разработки месторождений. Построенные по результатам радиоволнового просвечивания 3D карты распределения эффективных электрических сопротивлений отражают основные морфологические и литологические особенности строения месторождений.

□ Изучение межскважинного пространства радиоволновым методом позволяет получить новую по качеству информацию о литологических и электрических характеристиках пород, их распределении в пространстве. По данным повторных наблюдений можно оценивать динамику растекания технологических растворов в межскважинном пространстве и на этой основе осуществлять мониторинг процесса разработки месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов Б. Ф., Истратов В. А., Лысов М. Г. Способ радиоволнового межскважинного просвечивания: Патент России №2084930 от 22.07.93.
2. Борисов Б. Ф., Гуревич Г. Ф., Чигирина И. И., 1981, Радиопросвечивание в анизотропных средах при редкой сети бурения: Труды ЦНИГРИ, вып. 161, 90 - 96.
3. Гуревич Г. Ф., 1964, Применение радиоволнового просвечивания в низкоомных геоэлектрических разрезах: Труды ЦНИГРИ, вып. 58., 23 - 27.
4. Даев Д. С., 1959, Об обработке и истолковании данных радиоволнового просвечивания: М., Изв. вузов. Геология и разведка, 6.
5. Даев Д. С., Сердинов А. И., Тархов А. Г., 1963, Моделирование задач метода радиоволнового просвечивания: Изв. АН СССР. Серия геофиз., 6.
6. Истратов В. А., Скринник А. В., Перекалин С. О., 2006, Новая аппаратура для радиоволновой геонтроскопии горных пород в межскважинном пространстве РВГИ-2005: Приборы и системы разведочной геофизики, 1, 20 - 26.
7. Кобранова В. Н., 1962, Физические свойства горных пород: М., Гостоптехиздат.
8. Колбенков А. В., 2009, О возможности контроля процесса подземного выщелачивания методами электрического и электромагнитного каротажа на примере Далматовского уранового месторождения: Известия вузов. Геология и разведка, 2, 78 - 81.
9. Лаверов Н. П., Абдульманов И. Г., Бровин К. Г. и др.; Под ред. Лаверова Н. П., 1998, Подземное выщелачивание полизементных руд: М., Издательство Академии горных наук.
10. Лайл Дж., 1979, Машинная томография в геофизике: ТИИЭР, 67, 7.
11. Петровский А. Д., 1971, Радиоволновые методы в подземной геофизике: М., Недра.
12. Петровский А. Д., Гуревич Г. Ф., 1964, К вопросу о применении сравнительно низких частот при радиоволновом просвечивании: Труды ЦНИГРИ, вып. 59, 44 - 63.
13. Петровский А. Д., Смирнова Л. В., 1970, Некоторые результаты моделирования и их использование при проектировании и интерпретации радиоволнового просвечивания: Методы шахтной и скважинной геофизики: Труды ЦНИГРИ, вып. 89, 3 - 14.
14. Рэдклифф Р. Д., Баланис К. А., 1979, Геофизические применения алгоритмов восстановления в присутствии шумов: ТИИЭР, 67, 7, 98 - 102.

15. Шумилин М. В. и др., 1985, Разведка месторождений урана для отработки методом подземного выщелачивания: М., Недра.

16. Фейнберг Е. Л., 1961, Распространение радиоволн вдоль земной поверхности: М., Изд-во АН СССР.

17. Istratov V. A., Frolov A. D., 2003, Radio wave borehole measurements to determine in situ the electric property distribution in a massif: J. Geophys. Res.-Planets, 108, E4.

ОБ АВТОРАХ



**Вячеслав Александрович
ИСТРАТОВ**

Генеральный директор ООО "Радионда". Окончил в 1975 г. геофизический факультет Московского геологоразведочного института, кандидат техн. наук. Научные интересы - радиосигновые методы изучения межскважинного пространства, технологии объемного картирования. Автор более 30 научных публикаций.



**Алексей Викторович
КОЛБЕНКОВ**

Главный геофизик ООО "Радионда СПВ". Окончил в 2006 г. геофизический факультет РГГРУ. Научные интересы - геофизические методы исследования месторождений урана. Автор 6 научных публикаций.



**Сергей Олегович
ПЕРЕКАЛИН**

Окончил в 1975 г. Московский государственный университет по специальности геофизические методы поисков и разведки полезных ископаемых. Научные интересы - электромагнитные методы скважинной геофизики, каротаж скважин. Автор 4 изобретений и более 20 научных работ.



**Александр Викторович
СКРИННИК**

Главный конструктор ООО "Тульский геофизический центр". Окончил Тульский государственный университет в 1997 г., кафедра "Техническая кибернетика". Научные интересы - разработка аппаратуры для скважинных электромагнитных исследований. Автор 5 научных публикаций.

Рецензент - доктор техн. наук Б. С. Светов.