

УДК 550.837.75

РАДИОВОЛНОВОЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕЖСКВАЖИННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

© 2009 В.А. Истратов, А.В. Колбенков, Е.В. Лях, С.О. Перекалин

ООО «Радионда», Москва, 121614; e-mail: radionda@rol.ru

При разработке нефтяных месторождений и эксплуатации подземных хранилищ газа существует актуальная задача контроля процесса замещения одного флюида (нефти, газа) другим (водой). Аналогичная задача стоит и при скважинном подземном выщелачивании урана, при котором пластовые воды замещаются растворами кислоты либо газообразным окислителем. В статье изложена разработанная в ООО «Радионда» технология 3D-геоэлектрического картирования межскважинного пространства способом радиоволновой геоинтроскопии (РВГИ). Приведены результаты экспериментального опробования этой технологии для мониторинга процесса эксплуатации нефтяных и урановых месторождений на разных стадиях их разработки.

Ключевые слова: скважинное радиоволновое просвечивание, мониторинг, нефть, уран, подземное выщелачивание.

В круге задач, традиционно решаемых геофизическими методами, все более значительное место занимает относительно новое направление – задачи контроля (мониторинга) технологических процессов на разрабатываемых месторождениях (Дворкин, 2001; Alimbaugh et al., 2009).

При разработке нефтяных месторождений и эксплуатации подземных хранилищ газа существует актуальная задача контроля процесса замещения одного флюида (нефти, газа) другим (водой). Аналогичная задача стоит на урановых месторождениях, разрабатываемых способом скважинного подземного выщелачивания, при котором природные растворы замещаются растворами кислоты.

Общим в этих способах разработки является закачка в проницаемые пласты (коллекторы), содержащие полезные компоненты, технологических растворов под определенным давлением. На месторождении создается система закачных и откачных скважин, распределение в пространстве и режим работы которых определяются расчетами на основе фильтрационных характеристик и мощности коллекторов, пластовых давлений, содержания полезного компонента и свойств флюидов (вязкость, плотность).

Однако, в силу неоднородности геологической среды и приближенной оценке коллекторских свойств рабочих пластов по данным петро-

физических исследований керна и каротажа отдельных скважин, результаты расчетов для всего месторождения носят вероятностный характер и при практической реализации технологических схем возникают значительные расхождения с планируемыми показателями разработки. На месторождениях нефти это нередко приводит к их преждевременному заводнению и переводу части запасов в разряд неизвлекаемых. Аналогичные проблемы на подземных хранилищах газа снижают их емкостные характеристики, увеличивают потери газа. На месторождениях урана неэффективная прокачка кислотных растворов не приносит ожидаемого эффекта выщелачивания и добычи металла.

Таким образом, крайне актуальной стала задача применения геофизических методов, обеспечивающих эффективный контроль над развитием технологических процессов.

В настоящее время задачи мониторинга технологических процессов в той или иной мере решаются различными методами каротажа. Недостатком методов каротажа является их малая глубинность, ограниченная область, непосредственно прилегающей к скважине. При сильной литологической неоднородности разреза на деж но определить изменчивость фильтрационных свойств и, соответственно, распределение технологических растворов в

межскважинном пространстве только по данным каротажа затруднительно. Преодолеть эти недостатки возможно, если дополнить применяемые комплексы геофизических методов межскважинными исследованиями.

Изучение строения и определение физических свойств горных пород в пространстве между скважинами проводится методами скважинной геофизики с использованием звуковых колебаний (сейсмоакустика) или электромагнитных полей (электроразведка). Среди электроразведочных методов изучения межскважинного пространства наиболее перспективным, по нашему мнению, является метод радиоволнового просвечивания, обладающий высокой чувствительностью к изменению электрических свойств пород и лучшей разрешающей способностью при выделении слабоконтрастных неоднородностей небольших размеров. В данной работе рассмотрим возможности этого метода для мониторинга процесса разработки нефтяных и урановых месторождений.

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ

С позиций геоэлектрики процесс разработки месторождений в первом приближении можно представить следующим образом:

– вмещающие породы представляют собой горизонтально слоистую среду, в которой литологическая неоднородность пород сопровождается дифференциацией их электрических характеристик: удельного электрического сопротивления (ρ) и относительной диэлектрической проницаемости (ϵ/ϵ_0);

– рабочие пласты-коллекторы с повышенной пористостью (проницаемостью, коэффициентом фильтрации) отличаются от вмещающих пород по электрическим свойствам, которые в определенной мере зависят от свойств заполняющего поры флюида.

– процесс разработки заключается в замене природного флюида на технологический раствор, существенно отличающийся от первого по электрическим свойствам: нефть (газ) – вода, вода – раствор кислоты.

– в пластах, где технологический процесс протекает наиболее интенсивно, изменение электрических характеристик будет наиболее заметно.

– на интервалах непроницаемых (например, глинистых) пород изменений в электрических характеристиках не произойдет и их можно использовать в качестве опорных пластов-маркеров при мониторинге.

Таким образом, электрические характеристики являются весьма информативными физи-

ческими параметрами, а их изменение в процессе разработки может являться предметом изучения с помощью электромагнитных методов.

Рудовмещающие горизонты залегают на глубинах в сотни и тысячи метров, при которых возможности наземных геофизических методов ограничены. Препградой для применения скважинных электромагнитных методов являлось наличие металлических обсадных колонн, экранирующих электромагнитное поле. Однако, в последние годы все более частое использование для обсадки скважин неметаллических труб (стеклопластик, полиэтилен, поливинилхлорид) открывает новые перспективы для электромагнитных методов (Истратов и др., 2000; Лях и др., 2006).

Возможности межскважинных исследований существенно зависят от расстояния между скважинами и их размещения на площади месторождения (прямоугольная буровая сеть, либо гексагональная).

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Хорошими возможностями для решения задач контроля технологических процессов в межскважинном пространстве обладает радиоволновой метод. Физико-геологической основой метода является зависимость интенсивности поглощения энергии радиоволн горными породами, расположенными на трассе распространения волны, от электрических характеристик пород (Борисов и др., 1981, 1993; Петровский, 1970).

В развитие геотехнических возможностей радиоволнового метода в ООО «Радионда LTD» разработана технология объемного геоэлектрического картирования межскважинного пространства способом радиоволновой геоинтроскопии (РВГИ) (Istratov, Frolov, 2003), включающая высокочувствительную скважинную аппаратуру, методику измерений и программы обработки.

По результатам радиоволновой геоинтроскопии межскважинного пространства возможно определение электрических свойств элементов геологической среды *in situ*, а также количественная оценка их изменения в исследуемом массиве.

Скважинная аппаратура серии «РВГИ» (Истратов и др., 2006) предназначена для излучения и измерения напряженности электромагнитного поля в скважинах с помощью электрических диполей (установка $E_z E_z$). Отличительной особенностью этой аппаратуры является то, что приемник и передатчик, опускаемые в скважины, соединяются с каротажным кабелем через диэлектрические вставки с оптическим кабелем и блоками оптико-электрического преобразова-

ния. Это позволяет исключить антенный эффект от каротажного кабеля и управлять скважинными приборами с поверхности. В процессе измерений ведется цифровая регистрация измеряемой компоненты поля и тока в излучающей антенне, осуществляется дистанционное согласование антенны с передатчиком для достижения резонансного увеличения тока. В приемнике, за счет цифровой фильтрации, удается сузить полосу пропускания до 12 Гц и получить практически предельную на данном этапе чувствительность в 0.04 мкВ. В целом, аппаратура обеспечивает на частотах 0.03–0.15 МГц максимально высокий коэффициент измерительной установки (даже для коротких антенн длиной от 2 до 8 м), который и определяет дальность просвечивания. Экспериментально полученная эффективная дальность, зависящая также от удельного электрического сопротивления вмещающих пород, составила, например, в карбонатных породах нефтяных месторождений ($\rho=300-500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) не менее 600 м, а в крайне низкоомных водонасыщенных песчано-глинистых отложениях гидрогенных месторождений урана ($\rho=10-40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) – 60-90 м. Эти значения вполне соответствует параметрам применяемых на месторождениях систем расположения скважин и обеспечивают проведение исследований межскважинного пространства на всех этапах разработки.

Методика исследований межскважинного пространства предусматривает проведение измерений по так называемой веерной схеме (рис. 1б), когда в одну из скважин опускается передатчик, а в другую – приемник. При фиксированном положении передатчика, во второй скважине, где находится приемник, по точкам с заданным шагом проводятся измерения. Затем в первой скважине излучатель перемещается на шаг в следующий пункт и измерения во второй скважине повторяются. Многочисленное перекрытие лучей просвечивания по различным направлениям (томографическая съемка) обеспечивает высокую детальность исследования межскважинного пространства.

Задача объемного геоэлектрического картирования предъявляет к методике исследований дополнительные требования:

- на каждом этапе мониторинга измерения по всему участку должны проводиться на одной оптимальной для данных условий рабочей частоте;

- при выборе рабочей частоты, кроме эффективной дальности, необходимо учитывать размер области, существенной для распространения радиоволн (диаметр первой зоны Френеля – d_f) (Фейнберг, 1961). При фиксированном расстоянии между скважинами и сопротивлении пород, выбранная частота должна обеспечивать достаточное взаимное перекрытие зон

Френеля по соседним сечениям просвечивания (рис. 1а);

- размеры излучающей и приемной антенн должны быть идентичны и максимально короткими (2–10 м), так как их размер существенно влияет на разрешающую способность РВГИ;

- в зависимости от расстояния между скважинами (R) и длины интервала измерений в скважине (Δh) шаг перемещения приборов должен быть одинаков по всему участку исследований и может составлять от 1 до 5 м (рис. 1б).

Авторами установлено, что наиболее благоприятные условия для объемного геокартирова-

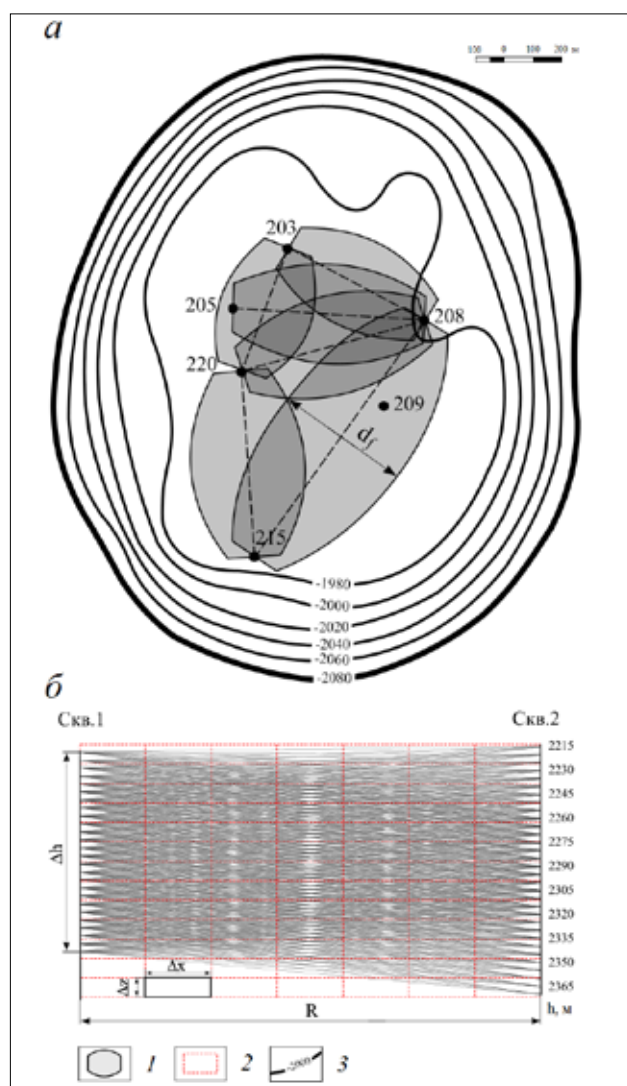


Рис. 1. Схема измерений РВГИ на Пихтовом месторождении нефти.

а – горизонтальная проекция;

б – вертикальная проекция.

1 – проекция зон Френеля на горизонтальную плоскость;

2 – элементарная ячейка при томографической обработке;

3 – изогипсы кровли Т-Фм1;

d_f – диаметр первой зоны Френеля для середины расстояния между скважинами.

ния РВГИ возникают при равномерной треугольной (или гексагональной) сети скважин и длине интервала измерений в скважинах $\Delta h \geq R/4$.

Обработка данных РВГИ проводится способами томографического (2D) и волнового (3D) восстановления с помощью пакета программ, который содержит оригинальные итерационные алгоритмы расчетов электрических характеристик среды.

Обработка данных в каждом отдельном сечении производится с применением известного двумерного итерационного томографического алгоритма (Рэдклифф, Баланис, 1979), суть которого состоит в следующем. Пространство между скважинами разбивается на равные ячейки, размер которых (Δx и Δz на рис. 1а) определяется длиной волны в среде и расстоянием между скважинами. Каждый луч просвечивания пересекает несколько ячеек. Определенный вдоль луча кажущийся коэффициент поглощения (k''_k) считается равным сумме коэффициентов поглощений в пересекаемых ячейках с весовыми коэффициентами пропорциональными длине луча в пределах каждой ячейки. Многократное пересечение лучей, проходящих в разных направлениях, дают возможность составить и решить систему уравнений и для каждой ячейки определить коэффициент поглощения, а значит и эффективное электрическое сопротивление. Томографический алгоритм представляет собой решение двумерной обратной задачи в предположении, что на коэффициент поглощения вдоль луча не влияет сопротивление соседних не пересекаемых лучом ячеек. Однако известно, что на распространение сферической волны из одной точки в другую оказывает влияние среда, ограниченная областью, существенной для распространения волны (зона Френеля).

Закономерности распределение поля внутри зоны Френеля и ее геометрические размеры используются в волновом методе восстановления. Этот метод, при наличии измерений РВГИ в нескольких не лежащих в одной плоскости сечений, дает возможность построить объемную геоэлектрическую карту. При этом осреднение кажущихся коэффициентов поглощений в каждой ячейке проводится по всем лучам, зоны Френеля которых охватывают эту ячейку. Весовые коэффициенты определяются удалением ячейки от соответствующих лучей. В результате такой обработки получается объемная матрица электрических сопротивлений, позволяющая построить 3D-геоэлектрическую карту всего исследованного блока. Карта может быть представлена набором горизонтальных сечений и произвольно ориентированных разрезов с изолиниями эффективных сопротивлений.

Оба метода 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 наиболее общие закономерности изменения электрического сопротивления в межскважинном пространстве.

Разрешающая способность метода при заданных расстояниях и сопротивлении пород определяется рабочей частотой и оценивается через минимальный поперечный размер уверенно выявляемой неоднородности (D_{\min}), расположенной на середине расстояния между скважинами, и точность локализации ее кромки (δ). По результатам расчетов и физического моделирования (Петровский, Смирнова, 1970) установлено, что надежными критериями для оценки разрешающей способности метода могут служить соотношения $D_{\min} \geq 0.3 d_f$ и $\delta \geq 0.1 d_f$. Так как современная точность измерений и процедура обработки позволяют выделять слабые аномалии в 15-20 % от первичного поля, то эти критерии выполняются вплоть до минимальной электрической контрастности неоднородности по отношению к вмещающим породам $\rho_n / \rho_{\text{вн}} \leq 1/2$. Например, в высокоомных карбонатных породах нефтяных месторождений и среднем расстоянии 500 м, $D_{\min} = 74$ м, $\delta = 25$ м. На урановых месторождениях при расстояниях до 40 м и сопротивлении пород менее 20 Ом·м — $D_{\min} \leq 10$, $\delta \leq 3$.

Межскважинные радиоволновые измерения обычно дополняются односкважинным радиоволновым профилированием (ОРВП), позволяющим увязать выделенные в межскважинном пространстве аномалии к разрезу скважин (Колбенков, 2009; Лях и др., 2006). При измерениях способом ОРВП излучатель, нагруженный на короткую электрическую антенну, находится на жестком разnose на одной оси с приемником, снабженным такой же антенной. Измерения производятся на нескольких фиксированных частотах из диапазона 1.0–50 МГц. Запись производится непрерывно, одновременно регистрируется ток на входе излучающей антенны и амплитуда поля на входе приемника. Передача данных от излучателя к приемнику и от приемника на каротажный кабель происходит через оптоэлектрические развязки, размещенные в диэлектрических корпусах. Обработка осуществляется по полным формулам для однородной среды. По результатам совместной обработки многочастотных измерений вычисляются эффективное электрическое сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ НА
РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Экспериментальные работы по оценке возможностей технологии РВГИ при мониторинге технологических процессов проводятся ООО «Радионда LTD» с 1999 года (Истратов и др., 2000) на нескольких разрабатываемых нефтяных и урановых месторождениях. Кратко рассмотрим наиболее интересные результаты.

Пихтовое месторождение нефти (Западный Урал) открыто в 1982 г. (рис. 2). Его нефтегазонасность связана с известняками фаменского и турнейского ярусов ($T+\Phi_{M_1}$, Φ_{M_2} , Φ_{M_3}). Нефте вмещающий рифовый массив имеет по кровле турнейского яруса форму купола. В пределах замкнутой изогипсы 2080 м его размеры – 2.75×2.7 км, амплитуда – 153.5 м (рис. 1а). Разработка ведется системой заводнения, и к настоящему времени актуальной является задача оценки степени выработки и распределения остаточных запасов нефти по разрезу $T-\Phi_{M}$ залежи.

Опытные работы по радиоволновому просвечиванию межскважинного пространства выполнены в 2007 г. в доступных для измерений интервалах открытого ствола в 6-ти сечениях из 4-х добывающих скважин – 203, 205, 208, 220 и нагнетательной скважины – 215. В каждом сечении измерения проведены на частоте 61 кГц, антеннами длиной 10 м, по веерной схеме с шагом 5 м. Отметим, что эффективная дальность просвечивания с аппаратурой «РВГИ», экспериментально полученная в карбонатных породах с сопротивлением 800–4000 Ом·м, составила 1100 м.

Как показано на рис. 1а, расстояния между исследованными скважинами существенно различаются: от 440 м (скв. 203–220) до 940 м (скв. 215–208). Поэтому обработка данных РВГИ для больших расстояний проведена по 2D томографическому алгоритму (рис. 3 на 4 стр. обложки), а по 4-м сечениям в центральной части залежи (скв. 203–205–220–208), образующим до-



Рис. 2. Местоположение исследованных месторождений.

статочно равномерную сеть, построена объемная геоэлектрическая карта способом волнового восстановления, фрагмент которой представлен на рис. 4 (4 стр. обложки).

В качестве примера рассмотрим представленный на рис. 3 геоэлектрический разрез, построенный по данным просвечивания из нагнетательной скважины 215 в добычную скважину 220, расположенную на удалении более 640 м. Как показано на рисунке, в пределах исследованной области по изолиниям эффективных сопротивлений в отложениях $T+\Phi_{M_1}$ удается выделить и оконтурить отдельные неоднородности. Так интервал плотных известняков мощностью 25–30 м, разделяющий нефте вмещающие пласты $T+\Phi_{M_1}$ и Φ_{M_2} , уверенно прослеживается в меридиональном направлении через все месторождение в виде области максимально высоких сопротивлений, которая картирует пологую структуру рифа с купольной частью вблизи скв. 220 и пологим ($3-4^\circ$) южным крылом. Областью наименьших сопротивлений вблизи нагнетательной скв. 215 на интервале глубин (-1976 м – -1992 м) выделяется пласт, состоящий из нескольких сближенных коллекторов. По данным ОРВП этот пласт проявляется как водонасыщенный коллектор (низкое ρ , высокая ϵ) и является основным, принимающим техническую воду. По изолиниям сопротивления можно предположить, что заводненная часть этого пласта прослеживается в этом сечении в северном направлении от скв. 215 на расстояние не более 200 м и в настоящее время не доходит до ствола скв. 220. В другой части разреза вблизи скважины 220 на интервале глубин -1965 – -1990 м выделяется сложно построенная зона пониженного сопротивления. По данным ОРВП здесь можно выделить несколько сближенных коллекторов, которые, судя по низким значениям $\epsilon_{эф}$, могут являться еще преимущественно нефтенасыщенными.

Ограниченность рабочего интервала измерений по скв. 220 не позволяет уверенно проследить поведение в межскважинном пространстве выявленных на горизонте Φ_{M_2} низкоомных областей. На этом разрезе можно только отметить, что пласт Φ_{M_2} весьма неоднороден и в призабойной зоне скважины 220, где по ОРВП отмечается водонасыщенные интервалы, он имеет более низкое сопротивление, чем в аналогичном интервале в скважине 215. Тем не менее, анализ всех полученных данных (разрезы РВГИ по сечениям между скважинами 220–205, 220–203) позволяет говорить о том, что, например, заводнение скважины 220 вероятнее всего происходит не на прямую от нагнетательной скважины 215, а с западного направления и по пласту Φ_{M_2} .

Закономерности изменения сопротивления

по латерали можно проследить на горизонтальных сечениях 3D геоэлектрической карты, построенных по горизонтам выделенных коллекторов. Для примера рассмотрим горизонтальное сечение карты по одному из пластов-коллекторов (рис. 4). На рисунке показано, что изолинии наибольших сопротивлений сосредоточены в восточной части блока вблизи скв. 208. К северу и западу эффективное сопротивление пород постепенно понижается и имеет наиболее низкое значение у скв. 205. Эта закономерность прослеживается и на горизонтальных сечениях по другим пластам. Если рассматривать понижение сопротивления пластов как характеристику степени их водонасыщенности, то, с высокой вероятностью, можно предположить, что фронт заводнения центральной части залежи продвигается с западного и северного направлений, а остаточные запасы нефти сосредоточены в ее восточной и южной частях.

В целом, радиоволновое просвечивание межскважинного пространства в комплексе с данными каротажа и односкважинного радиоволнового профилирования позволяет выявлять основные структурные и морфологические особенности строения нефтяной залежи, оконтуривать области наибольшего заводнения и может быть использовано для мониторинга процесса разработки.

Далматовское месторождение урана (Курганская область), отрабатываемое способом подземного выщелачивания (СПВ), было выбрано в 2005 году для экспериментальной оценки возможностей РВГИ при картировании распространения окислителя в межскважинном пространстве в горизонтально слоистых разрезах, когда сопротивление песчано-глинистых отложений составляет менее 30 Ом·м (рис. 2).

Месторождение приурочено к отложениям речной палеодолины. Рудоносный горизонт представлен чередованием маломощных и невыдержанных по латерали пропластков песчано-гравийных и глинистых отложений. Удельное электрическое сопротивление пластовой воды составляет 4–5 Ом·м. Выщелачивание проводится с использованием раствора серной кислоты, удельное электрическое сопротивление которого составляет 0,3–1,0 Ом·м.

Блок разбурен по гексагональной сети с одинаковым расстоянием между скважинами около 35 м, при которой каждая откачная скважина окружена шестью закачными. Скважины обсажены полиэтиленовыми трубами и в интервале продуктивного пласта на глубине около 440 м оборудованы фильтрами длиной по 8–12 м.

Радиоволновые исследования были проведены в вариантах односкважинных и межскважинных измерений в два этапа — до подачи окисли-

теля и через 8 месяцев после начала закисления участка. Съёмка осуществлялась между всеми соседними скважинами гексагональной сети. Измерения проводились в пределах фильтровой части на частоте 61 кГц антеннами длиной 5 м с шагом 2 м. Диаметр зоны Френеля в средней части сечения составил около 20 м и обеспечил взаимное перекрытие соседних сечений так, что между ними не оставалось неисследованных областей.

По результатам межскважинных радиоволновых исследований в 72 сечениях построена объемная геоэлектрическая карта эффективных сопротивлений, один из фрагментов которой приведен на рис. 5а (4 стр. обложки) в виде горизонтального сечения по глубине 444 м. В первую очередь следует выделить область минимальных эффективных сопротивлений в 4–6 Ом·м, расположенную в центральной части исследованного участка и протягивающуюся в направлении с северо-запада на юго-восток. Севернее и южнее этой области расположены участки более высокого сопротивления в 12–16 Ом·м. Принимая за основу предложенную выше 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 будет происходить по наиболее проницаемым, хорошо фильтрующим породам, представленным песчано-гравийными отложениями. Наиболее вероятно, что область низких сопротивлений картирует русло палеореки. 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 (Дахнов, 1982), принимая среднюю пористость продуктивного пласта равной 30 % и используя связь электрического сопротивления серной кислоты с ее концентрацией в растворе, можно получить количественную оценку степени закисления пород для областей различного сопротивления. Так, на участках пород с эффективным сопротивлением $\rho_{эф} = 5$ Ом·м сопротивление насыщающего поры пород флюида будет составлять около 0,5 Ом·м, что соответствует концентрациям кислоты не менее 8 г/л. Аналогично, эффективному сопротивлению пород в 10 Ом·м будет соответствовать содержание кислоты более 4 г/л. Полученные значения достаточно близки к имеющимся технологическим данным.

В соответствии с этими расчетами, на рис. 5б (4 стр. обложки) приведена карта геолого-технологической интерпретации данных объемного геокартирования методом РВГИ. Отметим,

что контуры глинистых пород, полученные путем стандартного осреднения геологических (и каротажных) данных, в основном соответствует участкам пониженного закисления по данным РВГИ, но существенно менее детально и информативны.

Месторождение урана Южный Букинай (Республика Узбекистан) относится к гидротермальным месторождениям с прибрежно-морским типом разреза и разрабатывается по технологии миниреагентного выщелачивания (рис. 2). Рудный горизонт находится на глубине 118–124 м и представлен песками с линзами мергелей и глин, водоупорами являются известняки и мергели. В условиях высокой карбонатности разреза применение серной кислоты из-за ее взаимодействия с вмещающими породами становится экономически нецелесообразным и для окисления урансодержащих руд используется газообразный окислитель. Для этого в скважины подается воздух (кислород) с избыточным давлением, при этом устья близлежащих скважин герметизируются. Через определенное время подача воздуха прекращается и возобновляется обычный режим эксплуатации с использованием слабого раствора кислоты. Когда концентрации урана в откачных скважинах становятся низкими, подача газообразного окислителя повторяется.

Радиоволновые исследования были проведены в 2007 году с целью оценки геотехнических характеристик и возможностей метода для выделения областей вытеснения поровых растворов газообразным окислителем. Если геоэлектрический эффект кислотного выщелачивания до начала исследований представлялся достаточно ясным, то процесс замещения порового флюида газообразным окислителем разными исследователями толковался по-разному. Отсутствовала достоверная информация о характере распространения воздушного потока в водонасыщенных песках и контрастности его границ по электрическому сопротивлению.

До начала эксперимента геоэлектрическая модель этого процесса представлялась авторам следующим образом. Подача газообразного окислителя в рабочий горизонт осуществляется через фильтровую часть скважины с избыточным давлением 5 атм. При относительно однородном составе проницаемых рудовмещающих песков можно ожидать, что газ непосредственно от фильтра будет подниматься вверх по разрезу и накапливаться у подошвы водоупорного горизонта, вытесняя поровые растворы и образуя своеобразный «газовый пузырь» – рабочее тело газообразного окислителя (РТГО). В однородной изотропной среде и при горизонтальной поверхности верхнего водоупора можно представить РТГО как локальное тело изометричной формы с

центром на оси закачной скважины, размеры которого будут постепенно увеличиваться по мере закачки. Наличие анизотропии или литологических неоднородностей (непроницаемых глинистых или карбонатных линз) отразится на форме РТГО, так как накопление газа будет происходить в наиболее проницаемых интервалах пород. При наклонной границе верхнего водоупора будет наблюдаться закономерное смещение РТГО в сторону восстания пород. Отметим также, что «карстовые карманы» в кровле перекрывающих пород будут являться ловушками для газа, а зоны трещиноватости в них – каналами его непродуктивной утечки.

В целом, пространственное распределение закаченного газа, т.е. объемное строение и развитие РТГО, и будет определять результативность закисления рабочего горизонта, а, следовательно, и эффективность выщелачивания урана.

Вытеснение поровых растворов газообразным окислителем приведет на начальном этапе к понижению водонасыщенности рудовмещающих песков и, соответственно, к повышению их электрического сопротивления и понижению относительной диэлектрической проницаемости. В радиоволновом поле на низких частотах (среда – квазипроводник) образование РТГО с достаточно контрастной поверхностью контакта «газ-вода» должно отразиться образованием положительной радиоволновой аномалии от локального объекта с пониженным коэффициентом поглощения. Интенсивность ожидаемой аномалии будет определяться размером тела и электрической контрастностью контакта.

Так как трудно было ожидать столь же значительных изменений электрического сопротивления пород, как при кислотном выщелачивании, экспериментальные работы предусматривали два этапа измерений: до и после подачи газообразного окислителя в рабочий горизонт. Сравнение полученных результатов позволяло выявить и оценить количественно ожидаемые изменения электрических свойств. Технические трудности заключались в том, что непосредственно после закачки воздуха проводить измерения нельзя, т.к. скважины находились под давлением, которое должно быть снято постепенно в течение суток во избежание разрушений фильтровой части скважин. По завершению этой процедуры повторная съемка всего участка должна быть осуществлена в кратчайшие сроки до исчезновения самого объекта исследований.

Для исследований был выбран участок, разбуренный по рядной сети с откачными скважинами 4-6-8 в центре и закачными скважинами по периферии (рис. 6а на 4 стр. обложки) Расстояние между рядами составляет 40–45 м, а между скважинами в ряду около 15–18 м.

На первом этапе, для получения исходного распределения эффективного сопротивления пород рабочего горизонта, просвечивание было выполнено по 27 сечениям (рис. 6а). Измерения проводились на частоте 156 кГц с антеннами длиной 4 м. Шаг измерений по скважине – 2 м.

После выполнения первого этапа работ в течение двух дней производилось нагнетание воздуха одновременно в две скважины – 4 и 6. При этом устья остальных скважин были герметизированы. Через 48 часов после окончания нагнетания на исследуемом участке в течение 2-х суток были проведены повторные измерения РВГИ в тех же сечениях и с прежней установкой. В результате повторных измерений были получены данные, содержащие информацию о сформировавшемся в рудном горизонте рабочем теле газообразного окислителя.

По результатам обработки данных измерений первого и второго этапов волновым методом восстановления были рассчитаны соответствующие 3D матрицы значений эффективного сопротивления. В качестве интерпретационного параметра, по которому можно судить о проникновении воздуха в межскважинное пространство, было выбрано отношение сопротивлений $W = \rho_2/\rho_1$, где ρ_1 и ρ_2 – эффективные значения сопротивления пород соответственно до и после закачки воздуха. Полученная в результате 3D карта параметра W представлена на рисунках 6б–е (4 стр. обложки) в виде аксонометрических проекций продольных и поперечных разрезов и горизонтальных сечений на глубинах 118 м, 124 м и 134 м. Логично, что критерием проникновения воздуха в исследуемое пространство будет значение параметра $W > 1$.

Полученный результат в целом подтвердил предполагаемую авторами геоэлектрическую модель процесса. После нагнетания воздуха уровень измеряемого поля существенно вырос (в отдельных сечениях на 2-3 порядка), отмечая положительную радиоволновую аномалию с высоким градиентом. Это свидетельствует о формировании в рудном горизонте высокоомной неоднородности с контрастными границами. Форма и размеры этой положительной аномалии параметра W будут характеризовать распространение окислителя в рабочем горизонте.

Как отчетливо видно на представленных сечениях положительная аномалия параметра W формируется от нагнетательной скв. 6. На разрезах верхняя граница аномалии четко прослеживается и совпадает с подошвой верхнего водоупорного пласта. Нижняя граница аномалии более изменчива и в некоторых сечениях (6 – 29, 6 – 31) прослеживается ниже интервалов фильтров. На поперечном разрезе (рис. 6в) в пространстве между скв. 6- 29 в ней отмечается

пережим мощности, связанный с литологической неоднородностью разреза.

По латерали границы аномалии имеют сложную форму. Сюда область распространения аномалии можно уверенно ограничить линией, проходящей через скважины 7-31 (рис. 6е). В сечении по глубине 124 м (середина фильтра в скв. 6) она прослеживается к скважинам 5 и 7, а в другом направлении – к скважинам 25-27-29. При этом она имеет небольшой пережим в треугольнике скважин 6-27-29, отмеченный ранее на поперечном разрезе. Выше по разрезу, на горизонте 118 м аномалия сохраняется только вблизи скважин 25-27 и 29-31 в соответствии с положением кровли рабочего горизонта. Важной особенностью выявленной и оконтуренной в пространстве положительной аномалии сопротивлений является то, что она не охватывает скважину 4, в которую также подавался воздух. Это означает, что по технологическим причинам (загрязнение фильтровой части или кальматации пород) воздух в пласт из этой скважины практически не поступал, а через дефекты обсадной колонны уходил в надрудный горизонт.

В целом можно заключить, что в условиях конкретного эксперимента контур РТГО имеет отнюдь не изометрическую, как ожидалось, а весьма сложную форму, определяемую, как литологической неоднородностью пласта, так и технологическими причинами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты экспериментальных радиоволновых исследований на ряде разрабатываемых урановых и нефтяных месторождениях являются первым примером применения радиоволнового метода для мониторинга технологических процессов в межскважинном пространстве, как у нас в стране, так и за рубежом.

Проведенные исследования подтвердили основные элементы предполагаемой геоэлектрической модели процесса разработки. Действительно, замещение природных флюидов в рудовмещающих пластах технологическими растворами сопровождается заметными изменениями электрических свойств пород, которые можно уверенно регистрировать при исследованиях межскважинного пространства электромагнитными методами. При кислотном выщелачивании урана, высокая электропроводность растворов кислоты является определяющим фактором, характеризующим сопротивление участков закисленных пород.

Разработанная скважинная радиоволновая аппаратура с контролируемым излучателем и высокочувствительным приемом обеспечивает требуемую эффективную дальность в условиях

применяемых стандартных сетей технологических скважин. Точность измерений и разрешающая способность исследований по методике радиоволновой геоинтроскопии достаточна для количественной оценки электрических характеристик пород в широком диапазоне их изменения в процессе разработки месторождений.

Построенные по результатам обработки данных РВГИ 3D карты распределения эффективных электрических сопротивлений, несмотря на их, несомненно, осредненный характер, отражают основные морфологические и литологические особенности строения месторождений и позволяют проводить оценку растекания технологических растворов в межскважинном пространстве.

Эксперимент с газообразным окислителем показал принципиальную возможность и перспективность применения РВГИ на подземных хранилищах газа, построенных в карбонатных рифах. Наличие на таких хранилищах нескольких наблюдательных скважин с открытым стволом (или неметаллической обсадкой), равномерно распределенных по площади на расстояниях 500–600 м, позволяет на основе сравнения результатов измерений в период максимального заполнения и в конце периода отбора газа, получить оценку фактической емкости хранилища, выявить и локализовать в пространстве участки возможного заводнения либо слабо проницаемых блоков.

Включение в комплекс геофизических исследований технологии объемного геоэлектрического картирования способом РВГИ на нефтяных и урановых месторождениях позволяет получить новую по качеству информацию о литологических характеристиках пород, их распределении в межскважинном пространстве и, на этой основе, осуществлять оперативный контроль за процессом разработки месторождений.

Список литературы

Борисов Б.Ф., Гуревич Г.Ф., Чигирин И.И. Радиопросвечивание в анизотропных средах при редкой сети бурения. // М.: Труды ЦНИГРИ, 1981. Вып. 161. С. 90–96.

Борисов Б.Ф., Истратов В.А., Лысов М.Г. С. 156. № 2084930. Способ радиоволнового межскважинного просвечивания.

Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М.: Недра, 1982. 591 с.

Дворкин В.И. Геофизический мониторинг раз-

работки нефтяных пластов, обсаженных стеклопластиковыми трубами. // Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2001. 200 с.

Истратов В.А., Лысов М.Г., Чибрикин И.В. Объемное геоэлектрическое картирование подземного пространства методом радиоволновой геоинтроскопии. // Подземное пространство мира. №3. Информационно-издательский центр «ТИМР». М.: 1997. С. 31–34.

Истратов В.А., Лысов М.Г., Чибрикин И.В. и др. Радиоволновая геоинтроскопия межскважинного пространства РВГИ на месторождениях нефти // Геофизика. 2000. Специальный выпуск. С. 90–93.

Истратов В.А., Скринник А.В., Перекалин С.О. Новая аппаратура для радиоволновой геоинтроскопии горных пород в межскважинном пространстве «РВГИ-2005» // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 1. С. 20–26.

Колбенков А.В. О возможности контроля процесса подземного выщелачивания методами электрического и электромагнитного каротажа на примере Далматовского уранового месторождения // Изв. вузов. Геология и разведка. 2009. № 4. С. 78–82.

Лях Е.В., Истратов В.А., Перекалин С.О. Опыт высокочастотных электромагнитных исследований в скважинах со стеклопластиковой обсадкой (СПОТ) для мониторинга процесса разработки нефтяных месторождений // Каротажник. 2006. Вып. 1 (142). С. 71–86.

Петровский А.Д. Радиоволновые методы в подземной геофизике // М.: Недра, 1971. 290 с.

Петровский А.Д., Смирнова Л.В. Некоторые результаты моделирования и их использование при проектировании и интерпретации радиоволнового просвечивания // Методы шахтной и скважинной геофизики. М.: Труды ЦНИГРИ, 1970. Вып. 89. С. 3–14.

Рэдклифф Р.Д., Баланис К.А. Геофизические применения алгоритмов восстановления в присутствии шумов // ТИИЭР. 1979. Т. 67. № 7. С. 98–102.

Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности // М.: Недра, 1961. 546 с.

Alimbaugh D., Wilt M., Zhang P. Finding bypassed pay in complex channel sands // First break. 2009. Is. 10. P. 63 – 67.

Istratov V.A., Frolov A.D. Radio wave borehole measurements to determine in situ the electric property distribution in a massif // J. Geophys. Res. 2003. Planets. V. 108. № E4. 8038. Doi: 10.1029/2002JE0080.

ИСТРАТОВ и др
**RADIOWAVE METHOD FOR MONITORING THE EXPLOITING
PROCESS IN INTERWELL SPACE**

V.A. Istratov, A.V. Kolbenkov, E.V. Lyakh, S.O. Perekalin

LLC «Radionda», Moscow, 121614

During the oil field development and using well storage fields scientists face the problem how to control replacement of gas or oil fluid by water fluid. The same challenge concerns the subsurface leaching on the uranium fields when acid solutions or gaseous oxidizer replace stratum waters. The article describes a method developed and introduced by 'Radionda Ltd' for 3D geoelectrical mapping of interwell space using a radio-wave geological nondestructive testing. The paper provides the results from the experimental tests of the method used for monitoring the exploitation of oil and uranium fields.

Keywords: crosswell radiowave tomography, monitoring, oil, uranium, subsurface leaching.