

ВЫДЕЛЕНИЕ ПЛАСТОВ-КОЛЛЕКТОРОВ В РАЗРЕЗЕ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО ДАННЫМ ЗОНДИРОВАНИЙ СТАНОВЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

А. В. Поспеев, И. В. Буддо, Ю. А. Агафонов, Н. О. Кожевников

АННОТАЦИЯ. В работе описан новый подход к интерпретации данных зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) с целью выделения пластов-коллекторов в разрезе осадочного чехла на юге Сибирской платформы. Предлагается представление геоэлектрического разреза осадочного чехла в виде переслаивания мощных высокоомных пластов с тонкими проводящими горизонтами-коллекторами. Создание геоэлектрических моделей базируется на априорной информации о глубине залегания и мощности горизонтов разреза, известных по результатам бурения. Раскрываются вопросы актуальности предложенной методики интерпретации, а также используемые программно-алгоритмические средства. В подтверждение эффективности предлагаемого подхода приводятся результаты исследований методом становления электромагнитного поля в ближней зоне на одном из участков юга Сибирской платформы.

Ключевые слова: нестационарные электромагнитные зондирования, методика интерпретации, пласт-коллектор, Сибирская платформа.

ABSTRACT. The work describes the new approach in interpretation of the non-stationary electromagnetic soundings, consisting of reservoirs allocation in sedimentary cover in southern part of the Siberian platform. Representation of geoelectric section of sedimentary cover as a kind of alternation of powerful high-resistance layers with thin conductive reservoir horizons is offered. Creation of geoelectric models is based on a priori information on occurrence depth and horizon thickness of the sedimentary section known from the drilling results. Questions of an actuality of the offered technique of the interpretation, used program-algorithmic tools reveal. The results of researches with a method of transient electromagnetic field soundings in a near zone on one of sites of the southern Siberian platform confirm the efficiency of the proposed approach.

Key words: non-stationary electromagnetic sounding, interpretation technique, reservoir, Siberian platform.

Введение

Нестационарные электромагнитные зондирования (НЭМЗ) традиционно применяются для решения широкого круга задач при изучении осадочного чехла [3, 5]. В числе этих задач исследование характеристик карбонатных и терригенных коллекторов, оценка типа их насыщения, прогноз горно-геологических условий бурения, мониторинг состояния коллекторов в процессе гидродинамического воздействия во времени. В мало-глубинной модификации электромагнитные исследования применяются для картирования водонасыщенных пластов-коллекторов в верхней части разреза. Известно, что наибольшую информативность и чувствительность к изменениям электропроводности горизонтов для условий Восточной Сибири имеют индукционные установки с незаземлёнными генераторными и приёмными петлями. Методика проведения нестационарных электромагнитных зондирования постоянно совершенствуется, применяются новые подходы к обработке и интерпретации сигналов [1]. Один из них - методика интерпретации в рамках многослойных (15 и более слоёв) геоэлектрических моделей разреза осадочного чехла, позволяющая проследить распространение в разрезе тонких пластов-коллекторов, оценивать их свойства и тип флюидонасыщения.

Метод зондирования становлением электромагнитного поля в ближней зоне разработан в 60-е годы (В. А. Сидоров, В. В. Тикшаев и др.). На Сибирской платформе он использовался в комплексе с другими геофизическими методами, например, сейсморазведкой, с целью картирования рельефа фундамента и структур осадочного чехла, выделения зон распространения водонасыщенных пластов-коллекторов. В то время применялась измерительная аппаратура, характеризующаяся, по нынешним меркам, небольшим динамическим диапазоном регистрируемого сигнала, а также низкой помехозащищённостью. За прошедшие годы были детально изучены вопросы разрешающей способности метода, а также влияние принципа эквивалентности на результаты интерпретации сигналов становления (Б. И. Рабинович, Л. Л. Ваньян, Л. А. Табаровский и др.). Некоторыми авторами (В. М. Панкратов и др.) была рассмотрена возможность не только изучения зон распространения пластов-коллекторов в разрезе, но и выделения на больших глубинах (один километр и более) тонких (первые десятки метров) пластов-коллекторов. В силу несовершенности аппаратуры того времени, а также "палеточной" методики интерпретации данных ЗСБ выделение тонких пластов было признано трудно осуществимой задачей.

В период 1990 - 2000 гг. произошёл резкий скачок в развитии цифровых технологий, что привело к появлению цифровых электроразведочных станций со значительным динамическим диапазоном измеряемого сигнала и частым арифметическим шагом дискретизации. Кроме того, активно развивались специализированные программные комплексы, позволяющие продвинуть возможности интерпретации данных электромагнитных зондирований на качественно новый уровень. Среди отечественных разработок вызывает интерес цифровая телеметрическая электроразведочная станция SGS-ТЕМ производства НПК "Сибгеосистемы", г. Новосибирск [7]. Аппаратура создана на основе 24-разрядного дельта-сигма АЦП, обеспечивающего широкий диапазон регистрируемого сигнала. Минимальный шаг дискретизации по времени составляет 31 мкс, что позволяет изучать быстроменяющиеся процессы поля становления. Кроме того, в базу данных сохраняются реализации сигнала становления на всём временном диапазоне с арифметическим шагом. Это открывает возможности для применения различных математических алгоритмов и фильтров с целью повышения соотношения сигнал/помеха. Параллельно с совершенствованием аппаратуры развивалось специальное программное обеспечение, позволяющее не только оптимизировать процесс измерения сигналов, но и управлять базами данных, проектировать сети наблюдения, производить математическую обработку, качественную и количественную интерпретацию кривых ЗСБ.

Актуальность выделения тонких пластов-коллекторов по данным ЗСБ в условиях юга Сибирской платформы

На юге Сибирской платформы осадочный чехол по структурным и литологическим признакам разделяется на три основных комплекса (сверху-вниз): надсолевой, карбонатно-галогенный и подсолевой. Надсолевая толща охватывает верхоленскую, илгинскую и др. свиты, карбонатно-галогенный комплекс - усольскую, бельскую, булайскую, ангарскую и литвинцевскую свиты. Перспективный в нефтегазоносном отношении подсолевой комплекс охватывает терригенные и карбонатные породы мотской свиты и нижнюю часть усольской свиты, включая осинский горизонт.

Метод ЗСБ позволяет изучать геоэлектрические свойства горизонтов осадочного чехла, в том числе, с использованием данных других методов геофизики и бурения глубоких скважин. Еще 10 - 15 лет назад достаточным являлось разделение разреза на 3 - 5 мощных слоёв, ассоциирующихся с основными комплексами пород осадочного чехла.

Обычно геоэлектрические модели, получаемые в результате инверсии кривых НЭМЗ, содержат не более 8 - 10 слоёв, т. е. геологический разрез аппроксимируется геоэлектрической моделью, толщины слоёв в которой составляют от 100 - 200 до нескольких сотен метров. Такое представление результатов электромагнитных зондирований не в полной мере отвечает нынешним требованиям заказчиков геофизических

работ. При проведении исследований с целью изучения пластов-коллекторов желательно получить информацию о характеристиках непосредственно пласта-коллектора, а не слоя мощностью в сотни метров с осреднёнными геоэлектрическими параметрами. Хотя такой мощный пласт обычно образован переслаиванием плотных осадочных пород и горизонтов-коллекторов, в силу особенностей распространения электромагнитного поля в среде детальное изучение тонких пластов представляет собой непростую задачу.

В статье рассматривается подход к интерпретации данных ЗСБ, в рамках которого предполагается получение многослойных тонкослоистых геоэлектрических моделей разреза. Данный подход основан на использовании данных сейсморазведки и бурения. Для его реализации необходимы следующие предпосылки: 1) достаточное количество априорной информации о разрезе, в т. ч. результаты бурения; 2) кривые ЗСБ зарегистрированы с высоким качеством; 3) сеть наблюдений достаточно плотная для надёжного прослеживания пластов-коллекторов; 4) кривые ЗСБ не осложнены влиянием трёхмерных неоднородностей, залегающими выше по разрезу проводниками-экранами, эффектами вызванной поляризации, магнитной вязкости и др.

Особенности традиционного и предлагаемого подходов в интерпретации кривых ЗСБ

Стандартная технология ЗСБ предусматривает регистрацию электромагнитных сигналов и их инверсию для получения геоэлектрических параметров разреза, на основании которых делаются дальнейшие геологические выводы. Поскольку традиционным способом представления результатов зондирований являются кривые кажущегося сопротивления и кажущейся проводимости S_{τ} (в зависимости от кажущейся глубины H_{τ}), зарегистрированные сигналы после необходимой редукции пересчитываются в кривые $\rho_{\tau}(t)$, $\rho_{\tau} = f\sqrt{2\pi T}$ или $S_{\tau}(H_{\tau})$.

Инверсия данных ЗСБ осуществляется путём ручного или автоматического подбора параметров модели, при которых достигается минимальная невязка между наблюденной и модельной кривыми. Задача инверсии является некорректной, что ограничивает возможности восстановления модели, описываемой большим числом параметров. Ситуация может быть улучшена за счёт привлечения априорной информации. Нередко при нефтепоисковых исследованиях глубины залегания и мощности горизонтов разреза известны по сейсмическим и буровым данным, что позволяет использовать эти данные при формировании геоэлектрической модели. После инверсии кривых ЗСБ с использованием детальных данных о глубине залегания и мощностях горизонтов основным результатом является информация об их удельном электрическом сопротивлении ($U'EC$). Геоэлектрические параметры, в свою очередь, уверенно коррелируют с типом насыщения коллекторов.

В условиях юга Сибирской платформы подобный подход имеет ограничения. Это связано с тем, что геоэлектрическая модель разреза лишь в её верхней части

(глубина до 1 км) может быть представлена набором относительно толстых слоёв примерно постоянного сопротивления. В породах карбонатно-галогенного и подсолевого комплексов более близким к реальности является переслаивание толстых слабопроницаемых высокоомных слоёв и тонких пластов-коллекторов с пониженным сопротивлением [2]. Поскольку породы карбонатно-галогенного и подсолевого комплексов глубоко литифицированы, их удельное электрическое сопротивление превышает первые тысячи Ом·м [4]. В этом случае УЭС пород в условиях их естественного залегания определяется количеством находящегося в поровом пространстве проводящего водного флюида и структурой порового пространства.

На практике для оценки сопротивления пород используют так называемый параметр объёмной пористости - P_v , представляющий собой соотношение сопротивления породы к сопротивлению пластового флюида (1):

$$P_v = \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{фл}} \quad (1)$$

В свою очередь, параметр объёмной пористости является функцией от коэффициента пористости, причём характер соотношения $P_v = f(\kappa_{\text{п}})$ определяется структурой порового пространства. Чем проще структура порового пространства, тем прямее пути перемещения ионов и, соответственно, ниже сопротивление породы. В билогарифмическом масштабе зависимости $P_v = f(\kappa_{\text{п}})$ для горных пород, характеризующихся схожей структурой порового пространства, аппроксимируются наклонными прямыми, которые могут быть представлены в виде известной формулы Арчи (2) [8]:

$$P_v = a\kappa_{\text{п}}^{-b} \quad (2)$$

Очевидно, для оценки сопротивления пород карбонатно-галогенного комплекса в зависимости от величины их пористости необходимо знание двух параметров: удельного электрического сопротивления водных растворов и констант формулы Арчи. Для нахождения последних используются петрофизические данные, полученные в условиях юга Сибирской платформы. Сопротивление пластовых вод рассчитывается с использованием параметров минерализации и температуры. Таким образом, существуют петрофизические предположения корреляции между геоэлектрическими и коллекторскими свойствами пород.

Геоэлектрическая модель с тонкими проводниками, залегающими в высокоомных вмещающих породах, согласуется с результатами геофизических исследований скважин. Поскольку для кривых индукционных зондирований характерна эквивалентность по S [6], корректно при решении обратной задачи оперировать величиной проводимости слоёв-коллекторов, оценивая их сопротивление позднее, с использованием данных об эффективных толщинах. Таким образом, задача инверсии формулируется следующим образом: необходимо определить не сопротивление пластов с известной глубиной кровли и подошвы, а проводимость плоскостей, залегающих на уровне слоёв-коллекторов,

глубина которых задаётся по независимым геологическим данным. Величина сопротивления среды, вмещающей пласты-коллекторы, принимается как максимальная для геоэлектрических разрезов, характерных для юга Сибирской платформы, и в среднем составляет около 500 - 600 Ом·м.

Методика инверсии, которая позволяет оценивать величину проводимости каждого горизонта-коллектора, основана на нескольких принципах. Во-первых, используются процедуры минимизации с понижением размерности пространства функционала невязки. Во-вторых, минимизируется количество обращений к прямой задаче для уменьшения времени расчетов. На входе процедуры инверсии в качестве стартовой используется "толстослоистая" геоэлектрическая модель, полученная в результате обычной методики интерпретации. В случае соответствия кривой ЗСБ отклику от горизонтально-слоистой модели среднеквадратическое расхождение между наблюденной и подобранной кривыми обычно не превышает 0,1%. Такое расхождение объясняется погрешностью регистрации и первичной обработки сигналов поля становления. После завершения инверсии оценивается эквивалентность решения. Для этой оценки используется величина, обратно пропорциональная крутизне параболы, аппроксимирующей функционал невязки при перераспределении проводимости пары ближайших проводящих плоскостей. То есть при неизменной величине суммарной проводимости разреза, проводимость в несколько шагов присваивается сначала одному горизонту, потом - второму, и при каждом изменении рассчитывается среднеквадратическое отклонение исходной кривой от полученной. Применение данного алгоритма показало целесообразность предварительной корректировки модели "толстослоистого" разреза, которая важна также для оценки эквивалентности моделей со слоями большой мощности. Очевидно, что эквивалентность геоэлектрических моделей тем меньше, чем дальше по глубине разнесены слои и чем больше их вклад в суммарную проводимость разреза [6].

Рис. 1 иллюстрирует способ оценки эквивалентности по крутизне параболы, аппроксимирующей функционал невязки, при перераспределении проводимости пары ближайших проводящих плоскостей. Минимум параболы 1 соответствует значению проводимости первого горизонта-коллектора 4 См, при котором достигается минимальная (0,1%) невязка δ между практической и модельной кривыми. Парабола 2 иллюстрирует ситуацию, когда горизонты-коллекторы залегают в разрезе близко друг к другу - на расстоянии 20 м. В таком случае график параболы очень пологий и значения проводимости от 3 до 5 См приводят к эквивалентным решениям.

Оценка применимости данного подхода требует ответа на некоторые вопросы: насколько велика погрешность решения для заданных параметров геоэлектрического разреза, какова точность регистрации и обработки кривых зондирования, имеет ли место влияние негоризонтальных неоднородностей разреза и частотной дисперсии кажущегося сопротивления?

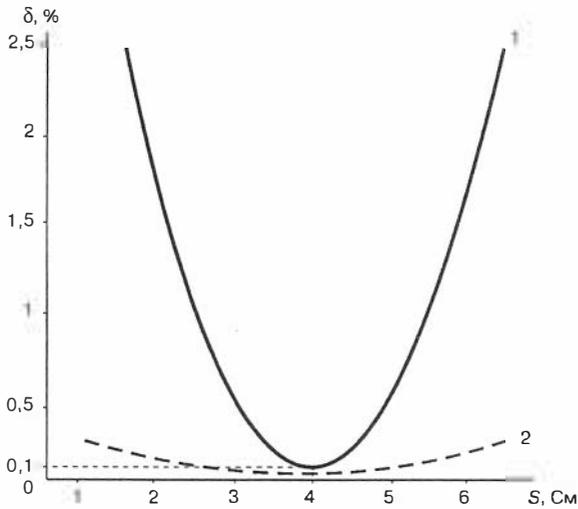


Рис. 1. Графики парабол, аппроксимирующих функциональную зависимость при перераспределении проводимости пары ближайших проводящих плоскостей: глубина от поверхности до верхнего пласта-коллектора 2 км. Шифр кривых характеризует расстояние между пластами-коллекторами: 1 - 100 м, 2 - 20 м

Оценка погрешности интерпретации может быть сделана путём инверсии теоретической кривой от заданного разреза, осложнённой случайным шумом. Применительно к подсоловой части разреза наиболее важны оценки возможности разделения проводимости карбонатной и терригенной частей подсолового комплекса, а также оценка разрешённости влияния от пластов-коллекторов внутри них. Результаты расчётов показывают, что для типичного геоэлектрического

разреза юга Сибирской платформы решение с точностью не хуже 15% достигается при среднеквадратической погрешности сигнала около 0,3%.

Примеры применения методики интерпретации в рамках многослойных моделей с тонкими слоями при изучении зон распространения пластов-коллекторов в подсоловом комплексе осадочного чехла юга Сибирской платформы

Для проверки геологической эффективности предложенной методики была проведена интерпретация данных ЗСБ, полученных на одном из участков юга Сибирской платформы. Исследуемый участок хорошо изучен сейсморазведочными работами МОГТ, кроме того, на площади исследования пробурено 24 глубоких скважины. В 2008 - 2009 гг. проведены работы ЗСБ с шагом 500 м, размер стороны генераторной петли 500 м. По результатам работ получен традиционный геоэлектрический разрез, отражающий зоны распространения пластов-коллекторов в карбонатно-галогенном и подсоловом комплексах (рис. 2).

С использованием предлагаемого подхода интерпретации с выделением тонких пластов-коллекторов был получен двадцатислойный геоэлектрический разрез. Глубины залегания, мощности и количество горизонтов определены по данным бурения, а также с учётом результатов сейсморазведочных работ. В результате было прослежено распространение осинского, парфёновского, боханского и базального пластов-коллекторов, определены их геоэлектрические характеристики.

На сейсмогеоэлектрическом разрезе (рис. 3) хорошо видно соответствие зон распространения горизон-

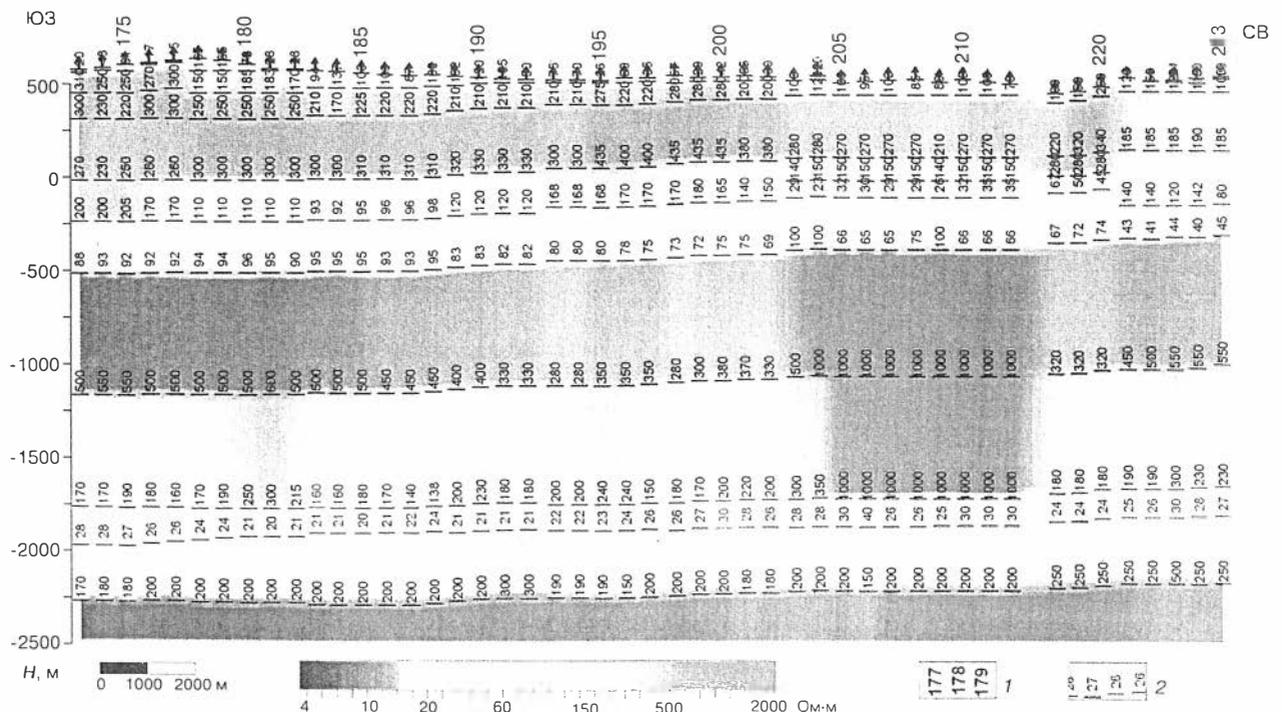


Рис. 2. Традиционный геоэлектрический разрез: 1 - номера пикетов ЗСБ; 2 - значения удельного электрического сопротивления горизонтов

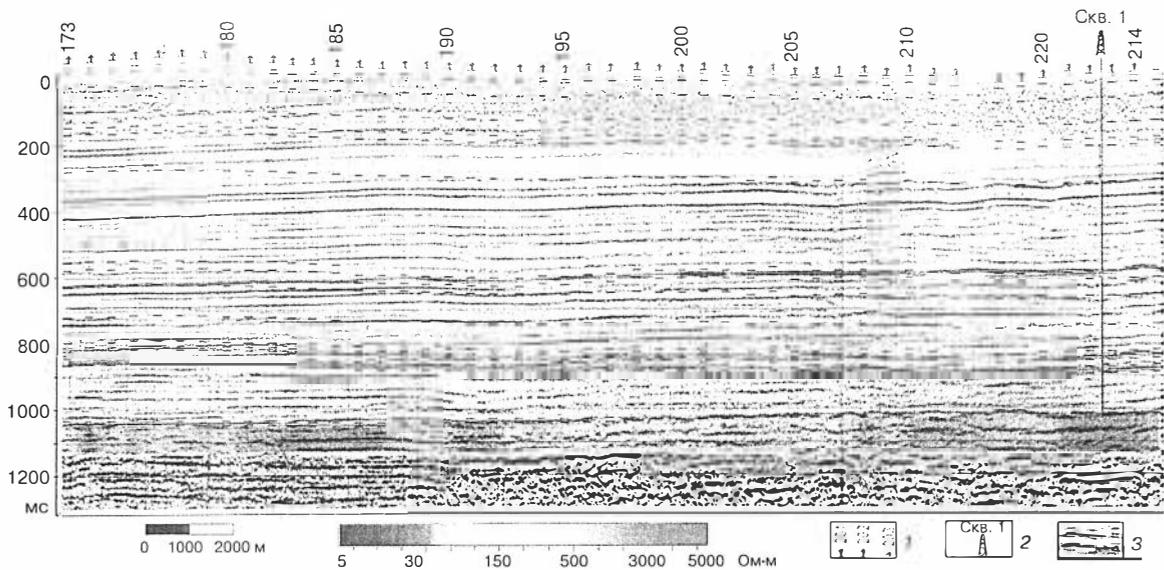


Рис. 3. Сейсмогеоэлектрический разрез с выделенными пластами-коллекторами: 1 - номера пикетов ЗСБ; 2 - скважина глубокого бурения; 3 - границы геoeлектрических горизонтов

тов-коллекторов, выделенных по данным МОГТ и ЗСБ. По результатам бурения скв. 1 получены притоки газа и водного флюида из боханского горизонта. Как видно из сейсмогеоэлектрического разреза, данные ЗСБ и результаты бурения хорошо коррелируют.

Применение данной методики интерпретации на других профилях показало хорошее соответствие геoeлектрических характеристик пластов-коллекторов с данными бурения и испытаний глубоких скважин. В таблице показаны результаты испытаний нескольких скважин глубокого бурения, через которые проходят профили ЗСБ. Проводимость горизонтов рассчитана при эффективной мощности 10 м. Видно, что величина проводимости ниже 3,7 См соответствует низким коллекторским свойствам горизонта, так как по результатам испытаний в скважинах притоков флюидов не получено. Диапазон 3,7 - 4,5 См соответствует либо в основном газовому насыщению горизонта, либо присутствию и газового, и водного флюидов. Значения проводимости, превышающие 4,5 См, соответствуют в основном водному насыщению коллектора. Таким образом, представляется возможным по значениям проводимости тонких горизонтов с высокой точностью прогнозировать тип флюидонасыщения пластов-коллекторов.

Выводы

Опираясь на полученные результаты, можно говорить об увеличении информативности нестационарных электромагнитных зондирований с применением предложенной методики. Это стало возможным благодаря развитию аппаратно-программных возможностей современной электроразведки. Значительный динамический диапазон регистрируемых сигналов, частый арифметический шаг дискретизации и возросшая помехозащищённость аппаратуры позволяют выделять в разрезе осадочного чехла тонкие контрастные проводники - пласты-коллекторы. Данное представление многослойного геoeлектрического разреза делает его более информативным и понятным с

геологической точки зрения, так как в результате интерпретации получают зоны распространения непосредственно тонких пластов-коллекторов, а не мощного слоя с некоторыми осреднёнными геoeлектрическими характеристиками. Высокая точность определения проводимости пластов-коллекторов позволяет с большей достоверностью не только прогнозировать коллекторские

Результаты испытаний некоторых скважин глубокого бурения, находящихся в пределах профилей ЗСБ

Скважина 1	Горизонт		
	Осинский	Парфеновский	Боханский
Результаты испытаний	сухо	сухо	вода
Электропроводность, См	2,1	2,7	4,9

Скважина 2	Горизонт		
	Осинский	Парфеновский	Боханский
Результаты испытаний	сухо	сухо	вода
Электропроводность, См	2,9	2,1	5,8

Скважина 3	Горизонт		
	Осинский	Парфеновский	Боханский
Результаты испытаний	сухо	вода, газ	сухо
Электропроводность, См	2,7	3,9	3,5

Скважина 4	Горизонт		
	Осинский	Парфеновский	Боханский
Результаты испытаний	сухо	сухо	газ
Электропроводность, См	2,3	2,4	3,7

свойства горизонтов, но и тип их флюидонасыщения. Однако следует отметить, что предложенный подход является дополнением к традиционной методике интерпретации ЗСБ и вряд ли может служить её заменой. Дальнейшее развитие методики интерпретации в рамках многослойных геоэлектрических моделей поможет выделять пласты-коллекторы во всех структурных этажах осадочного чехла, на новом уровне решать нефтегазописковые и другие задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агафонов Ю. А., Поспеев А. В., 2001, Программно-измерительный комплекс для работ методом ЗСБ: Геофизический вестник, 10, 8 - 11.
2. Анциферов А. С., Бакин В. Е., Варламов И. П. и др., 1981, Геология нефти и газа Сибирской платформы. Под ред. Конторовича А. Э., Суркова В. С., Трофимука А. А.: М., Недра.
3. Берштейн Г. Л., Мандельбаум М. М. и др., 1983, Геофизические методы обнаружения нефтегазовых залежей на Сибирской платформе: М., Недра.
4. Добрынин В. М., Вендельштейн Б. Ю., Кожевников Д. А., 2004, Петрофизика (физика горных пород): Москва.
5. Компаниец С. В., Буддо И. В., Гомульский В. В., 2010, Методика прогнозирования зон коллекторов и мониторинга геоэкологического состояния среды с применением электромагнитных зондирований в условиях юга Сибирской платформы: Приборы и системы разведочной геофизики, 01, 16 - 10.
6. Могилатов В. С., Захаркин А. К., Злобинский А. В., 2007, Математическое обеспечение электроразведки ЗСБ. Система "Подбор": Новосибирск, Гео.
7. Шарлов М. В., Агафонов Ю. А., Стефаненко С. М., 2010, Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования: Приборы и системы разведочной геофизики, 01, 20 - 24.
8. Archie G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics: Petroleum Transactions of AIME, 146, 54 - 62.

ОБ АВТОРАХ



Александр Валентинович ПОСПЕЕВ

Генеральный директор ЗАО "Восточный геофизический трест", доктор геол.-минер. наук, профессор. В 1976 г. окончил Иркутский политехнический институт (нынешний ИргТУ). Основные научные интересы: совершен-

ствование электромагнитных технологий. Автор более 40 научных работ.



Игорь Владимирович БУДДО

Геофизик ЗАО "Иркутское электроразведочное предприятие". Аспирант кафедры прикладной геофизики и геоинформатики Иркутского государственного технического университета. Окончил ИГТУ в 2007 г. Основные

научные интересы: нестационарные электромагнитные зондирования, выделение пластов-коллекторов в осадочном чехле, малоглубинные электромагнитные исследования. Автор 7 научных работ. Email: biv@ierp.ru



Юрий Александрович АГАФОНОВ

Директор ЗАО "Иркутское электроразведочное предприятие", кандидат техн. наук, выпускник Иркутского государственного технического университета, магистратура ИргТУ, 2000 г. Основные научные интересы:

нефтегазописковые электромагнитные исследования, технологии и программно-аппаратурные решения для электромагнитных методов, математическое моделирование электромагнитных сигналов. Автор более 45 научных работ. Email: aua@ierp.ru



Николай Олегович КОЖЕВНИКОВ

Главный научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, доктор геол.-минер. наук, профессор, выпускник физического факультета Иркутского

государственного университета, 1971 г. Основные научные интересы: метод переходных процессов, верхняя часть геологического разреза, магнитная вязкость геологических сред, археогеофизика, геофизика криолитозоны. Автор более 50 научных работ.

Рецензент - доктор техн. наук И. А. Безрук.