

УДК 550.837+550.832.7+550.822.7+553.048+539.217.1

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРОГНОЗ ОТКРЫТОЙ ПОРИСТОСТИ ВНЕ СКВАЖИН

В.В. Спичак, О.К. Захарова

*Центр геоэлектроманнитных исследований Института физики Земли РАН,
108840, Москва, Троцк, а/я 30, Россия*

Исследуются возможности прогноза коэффициента открытой пористости на глубину, а также в пространстве между скважинами, по данным электромагнитных зондирований и электрокаротажа. Модельные данные пористости синтезированы из данных лабораторных исследований на образцах пород из двух скважин, пробуренных на Бишкекском геодинамическом полигоне. Прогноз пористости осуществляется по данным удельного электрического сопротивления, полученным по одномерной инверсии результатов магнитотеллурического зондирования в окрестности скважин. Предложен новый способ прогноза пористости, основанный на построении электромагнитного псевдокаротажа сопротивления в пункте прогноза. Сравнение с другими вариантами прогноза показало, что его применение позволяет повысить точность оценки пористости в несколько раз (соответствующие относительные ошибки прогноза на удвоенную глубину и в межскважинном пространстве составляют в среднем 2 и 8 % соответственно). В то же время оценки пористости, сделанные с использованием формулы Арчи, дают худшие результаты.

Прогноз пористости, удельное электрическое сопротивление, магнитотеллурическое зондирование, электромагнитный псевдокаротаж сопротивления, искусственная нейросеть, формула Арчи

THE ELECTROMAGNETIC PREDICTION OF THE OPEN POROSITY BEYOND BOREHOLES

V.V. Spichak, O.K. Zakharova

Prediction of the open porosity factor below boreholes and in the interwell space, from electromagnetic sounding and electrical logging data, has been studied. Modeling porosity data are synthesized from laboratory studies on the samples of two boreholes drilled in the Bishkek geodynamic site. The porosity prediction is carried out using specific electrical resistivity data obtained from 1D inversion of magnetotelluric sounding data collected in the vicinities of these wells. A new approach to predict porosity is suggested, based on the constructing of electromagnetic resistivity pseudologs at the target location. The comparison of this technique with other options indicates that its application results in substantial improvement of the predicted accuracy (in particular, relative errors of prediction in double depth of the borehole and in the interwell space could be 2 and 8 %, respectively). In general, the porosity predictions, based on Archie formula, give worse results.

Prediction, porosity, specific electrical resistivity, magnetotelluric sounding, electromagnetic resistivity pseudolog, artificial neural network, Archie formula

ВВЕДЕНИЕ

Запасы углеводородных и геотермальных ресурсов традиционно рассчитываются для содержащего их пласта с учетом пористости/трещиноватости пород и их флюидонасыщенности, которые, в свою очередь, оцениваются по данным скважинных измерений этих параметров. Между тем для более точной оценки запасов необходимо интегрировать эти параметры по реальному объему, занимаемому коллектором. Для этого требуется оценка их пространственного распределения в пространстве между пробуренными скважинами, а также на глубинах ниже их забоя.

В настоящее время оценка фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллекторов осуществляется на основе их интерполяции/экстраполяции в пространстве вне скважин с помощью сейсмических атрибутов, выделенных по результатам корреляционного анализа [Pan, Ma, 1997; Dolberg et al., 2000; Копилевич, Сурова, 2012]. Между тем такой подход имеет ряд недостатков, которые могут приводить к потере точности оценок и, как следствие, к ошибкам в определении ресурсного потенциала. Во-первых, результаты сейсмотомографии усреднены по объему и в целом имеют плохое разрешение по вертикали [Pan, Ma, 1997]. Во-вторых, точность оценок резко падает, если разрез имеет сложную геометрию. Наконец, использование сейсмических атрибутов, максимально коррелирующих с немногочисленными скважинными данными по пористости, может приводить к ошибкам прогноза в других геолого-геофизических условиях вне скважин [Kalkomey, 1997].

Альтернативный подход, не требующий априорных предположений относительно литологии среды, а также корреляции сейсмических атрибутов с пористостью, может быть основан на применении

такого проксипараметра, как удельное электрическое сопротивление (УЭС). В работе [Спичак, Захарова, 2015] исследовалась возможность нейросетевого прогноза коэффициента открытой пористости на глубины ниже забоя скважин по данным электрокаротажа и результатам инверсии магнитотеллурических (МТ) данных, измеренных на геотермальном месторождении в Сульц-су-Форе (Франция). Было показано, что применение предложенного подхода, в принципе, позволяет делать прогноз пористости по значениям УЭС электрокаротажа в самой скважине, а также по его значениям, определенным с помощью инверсии данных наземного электромагнитного зондирования в окрестности скважины. Согласно этой работе, если прогнозные глубины превышают глубину скважины не более чем вдвое, то предпочтительнее прогноз по данным электрокаротажа; при соотношении глубин 5—10 заметно лучшие результаты дает прогноз по инвертированным данным электромагнитного зондирования; в промежуточном диапазоне ошибки прогноза примерно одинаковы. В то же время нейросетевой прогноз с одновременным использованием данных каротажа и результатов ЭМ зондирования в окрестности скважин в качестве исходных данных для обучения искусственной нейросети (ИНС) не дал заметного улучшения его точности.

В реальной ситуации каротажные данные ниже забоя скважины, которые можно было бы использовать для обучения ИНС, отсутствуют. Поэтому остается оценивать пористость на глубине только по результатам каротажа пористости в пробуренной части скважины и УЭС, полученному с помощью предварительной инверсии данных электромагнитных зондирований в ее окрестности. Еще одну возможность прогноза пористости дает ее оценка с помощью эмпирических формул (например, формулы Арчи [Archie, 1942]), примененных к значениям УЭС, определенным по данным электрокаротажа или по результатам электромагнитного зондирования в окрестности скважины. Поскольку вариантов такого прогноза может быть несколько, большой практический интерес представляет поиск наилучшего алгоритма, при котором соответствующие ошибки прогноза были бы минимальными.

Для исследований использовались данные из двух скважин (P1 и P2), пробуренных ранее на Бишкекском геодинамическом полигоне (Чуйская впадина Северного Тянь-Шаня), а также результаты магнитотеллурических зондирований (МТЗ) в их окрестности. Исследование возможности прогноза пористости по электромагнитным данным состояло из двух этапов. На первом этапе моделировался прогноз пористости на глубину, а на втором этапе — в пространстве между скважинами.

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УЧАСТКА

Структура Чуйской впадины является асимметричной с пологим склоном на севере и крутым на юге. В тектоническом плане это грабен-синклиналь субширотного простирания с горным обрамлением на юге (Киргизский хребет) и на северо-востоке (горы Кеныктас). Основание Чуйской впадины представлено породами палеозоя, погружающимися ступенеобразно на юг до глубин порядка 4 км. Мощность мезокайнозойских осадков в Чуйской впадине достигает 5 км в Предкиргизском прогибе и уменьшается до первых сотен метров на северо-западе и практически до нуля на северо-востоке.

Геoeлектрический разрез Чуйской впадины имеет надпорный низкоомный горизонт, отождествляемый с песчано-глинистыми отложениями палеоген-неогенового возраста [Юдахин, 1983]. Вариации электрического сопротивления в этом горизонте обусловлены фаціальными изменениями в донных отложениях, т. е. косвенно свидетельствуют об условиях осадконакопления и в тот период. В пределах Чуйской моноклинали в надпорном геoeлектрическом горизонте прослеживается тенденция уменьшения сопротивлений с северо-востока на юго-запад. Кроме того, как показывает опыт ([Лесик, 1988], [Макеев и др., 2004 г.]), в восточной части Чуйской впадины поведение удельного электрического сопротивления вблизи конкретных скважин может объясняться геологическими особенностями на соответствующих глубинах.

ЛИТОЛОГО-СТРАТИГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ГЛУБОКОГО БУРЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТ ОТКРЫТОЙ ПОРИСТОСТИ

Глубокое бурение в Восточно-Чуйской впадине велось на Серафимовской (скв. P1) и Беловодской (скв. P2) площадях.

Серафимовская площадь расположена в восточной части Предкиргизского прогиба. Геологический разрез, вскрытый скв. P1 на основании литологического состава и палеонтологических определений, подразделяется следующим образом: четвертичные отложения, Q_{IV} , Чуйская свита ($N_{1-2}cs$), киргизская свита (P_3-N_1kr) и палеозойские образования (рис. 1, а). Четвертичные отложения представлены валунно-галечными образованиями с прослоями суглинков с коэффициентом открытой пористости (далее — пористости) примерно 30 %, содержащих фауну остракод. Чуйская свита представлена часто чередующимися пластами глин, песчаников, гравелитов, паттумов, средняя пористость которых находится в пределах 10—12 %. Углеводородные газы, зафиксированные в разрезе скважины, по-видимому,

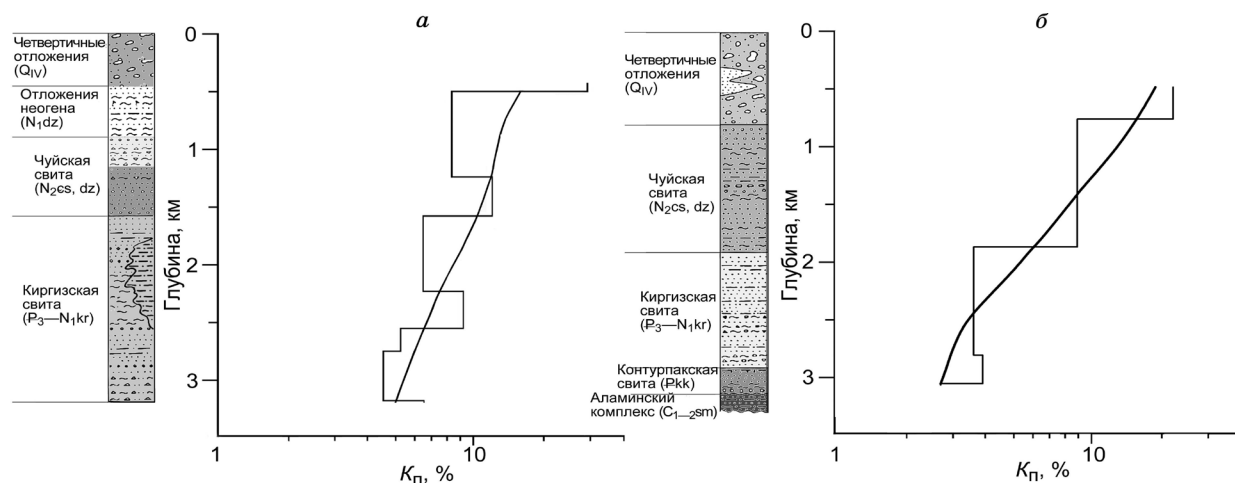


Рис. 1. Данные пористости, определенные на кернах (Макеев и др., 2004 г.), и синтезированные кривые пористости в скважинах P1 (а), P2 (б).

Слева показаны литологические колонки.

генетически не связаны с грубообломочными породами и являются результатом миграции из нижележащих отложений. Киргизская свита имеет большую мощность (~1.5 км), представлена чередованием алевролитов, глин, песчаников, алевролитов с пористостью от 10 до 4—5 %.

Разрез скважины представлен частым чередованием терригенных пород, поэтому каротажные кривые, отражающие литологические особенности разреза, имеют сильно дифференцированный характер.

Беловодская площадь находится в центральной части Предкиргизского прогиба. P2 вскрыла четвертичные валунно-галечные отложения с прослоями суглинков, имеющих пористость ~20—22 %; отложения чуйской (N_{1-2cs}) свиты, представленной часто чередующимися пластами глин, песчаников, гравелитов, паттумов со средней пористостью около 10 %; киргизской (P_3-N_{1kr}) свитой, представленной переслаиваниями песчаников, глин, алевролитов с низкой пористостью в районе 3.5 %; коктурпакской (Pkk) свиты, представленной глинами, песчаниками, паттумами и гравелитами, имеющими в среднем чуть более высокую пористость (4 %). С глубины 3106 м скважина вошла в каменноугольные отложения (C_{1-2sm}) и граниты аламинского комплекса с пористостью около 2 % (см. рис. 1, б). Таким образом, мы имеем разрез, сложенный осадочными терригенными породами, слабозатронутыми вторичными геологическими и тектоническими процессами осадконакопления.

Для исследований были использованы данные открытой пористости K_p , определенной авторами работы (Макеев и др., 2004 г.) по образцам керна с учетом литологии (см. графики на рис. 1). По этим данным были построены сплайн-аппроксимации с шагом 0.01 км по глубине.

УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОРОД

Для прогноза пористости использовались данные электрокаротажа скважин P1 и P2 (Макеев и др., 2004 г.) и вертикальные профили удельного сопротивления в пунктах МТ752 и МТ617 [Рыбин и др., 2008], полученные по МТ данным, измеренным в пунктах, расположенных на расстояниях 1.5 и 2.0 км от скважин.

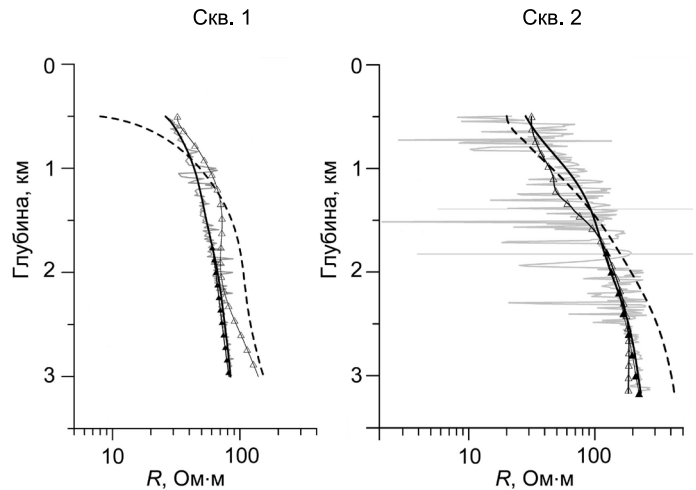
Электромагнитные данные представляли собой результаты магнитотеллурических зондирований, выполненных в диапазоне частот от $5 \cdot 10^{-4}$ до 300 Гц в непосредственной близости от скважин P1 и P2 (в пунктах МТ752 и МТ617 соответственно). Индикаторы размерности среды в рассматриваемых пунктах МТЗ для периодов менее 1с (соответствующих глубинам 3—4 км) не превосходили пороговых значений одномерности (0.1—0.2) индикатора размерности «скью» [Swift, 1967]. Поэтому для получения вертикальных профилей УЭС в каждой точке зондирования осуществлялась 1-D инверсия МТ данных [Рыбин и др., 2008] (профили показаны штриховыми линиями на рис. 2).

Электрокаротаж. Литологический разрез обеих скважин представлен частым чередованием терригенных пород (см. рис. 1), поэтому каротажные кривые (кажущееся электрическое сопротивление записывалось двумя потенциал-зондами), отражающие литологические особенности разрезов, имеют сильно дифференцированный характер (см. рис. 2) (Макеев и др., 2004 г.).

Значения кажущегося сопротивления пород на сглаженных графиках колеблются от 5—10 до 250—300 Ом·м. При этом валунно-галечные отложения имеют высокие значения кажущегося сопро-

Рис. 2. Электрокаротаж R_w (сплошная линия) (Макеев и др., 2004 г.), псевдоэлектрокаротаж R_w^* и УЭС R_{MT} в пунктах МТ752 и МТ617 в окрестности скважин Р1 и Р2 соответственно. Тонкими линиями обозначены исходные данные электрокаротажа.

Прогноз по данным другой скважины — линия с треугольниками, прогноз по данным верхней половины скважины — линия с затемненными треугольниками.



тивления 250—300 Ом·м; сопротивления пластов гравелитов, песчаников и глин составляют соответственно 40—80, 30—40 и 5—30 Ом·м.

Палеозойские образования имеют повышенные значения кажущегося сопротивления. Так, песчаники палеозоя характеризуются значениями кажущегося сопротивления 70—80 Ом·м (аналогичным породам неогена свойственно сопротивление 30—40 Ом·м). Значение кажущегося сопротивления кислых эффузивов достигает 300 Ом·м.

Псевдоэлектрокаротаж. Из сравнения результатов 1-D инверсии (R_{MT}) и электрокаротажа (R_w) в обеих скважинах (см. рис. 2) видно, что они заметно отличаются. Это связано как с разной погрешностью определения УЭС с помощью этих методов, так и с расстоянием между скважинами и пунктами, где они определены (хотя, как было показано в работе [Spichak et al., 2011], расстояния в пределах 2 км не являются критическими для нейросетевого прогноза параметров по вертикальному профилю УЭС, определенному в окрестности скважины). Поэтому представлялось важным сравнить точность соответствующих прогнозов пористости по этим данным. Как отмечалось выше, нейросетевой прогноз пористости в случае, когда при обучении ИНС на ее входе использовались оба типа данных, не дал улучшения. В то же время, как было показано в работе [Спичак, Захарова, 2015], прогноз пористости по данным электрокаротажа, вообще говоря, предпочтительнее прогноза по данным УЭС электромагнитных зондирований (по крайней мере, в масштабе скважины). Поскольку электрокаротаж отсутствует вне скважин, в настоящей работе был применен алгоритм, основанный на его имитации с помощью создания так называемого «псевдоэлектрокаротажа» (как на глубинах ниже забоя скважин, так и в пунктах прогноза пористости в пространстве между ними) по данным реального электрокаротажа (там, где он измерен) и УЭС электромагнитного зондирования в их окрестности. Идея алгоритма состоит в следующем:

- на первом этапе ИНС обучается соответствию данных R_{MT} и R_w из верхней половины (или всей скважины — в случае прогноза в межскважинном пространстве);
- на втором этапе обученная ИНС используется для прогноза УЭС псевдоэлектрокаротажа R_w^* в нижней половине скважины (или по всей глубине в точке прогноза) по известному УЭС R_{MT} .

На рисунке 2 показаны графики построенного предварительно псевдоэлектрокаротажа для двух случаев: прогноза на глубину (в реальности с верхней на нижнюю половину глубин скважин) и в межскважинном пространстве (в действительности в пункте расположения второй скважины). Как видно из сравнения этих графиков с соответствующими кривыми R_{MT} и R_w , они существенно ближе к данным электрокаротажа, чем кривые R_{MT} , что позволяет надеяться на их успешное использование для прогноза пористости.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗА

Для моделирования прогноза пористости на глубину и в пространство между скважинами использовались данные ГИС из скважин Р1 и Р2, а также магнитотеллурического зондирования в их окрестности. Использовались также сглаженные данные электрокаротажа (R_w) и результаты 1-D инверсии данных МТ зондирования (R_{MT}) (см. рис. 2). Все исходные данные были предварительно интерполированы по глубине на одну и ту же сетку с шагом 0.01 км.

Моделировались ситуации прогноза на глубины ниже забоя скважин и в межскважинном пространстве по данным электрокаротажа (R_w) и результатам 1-D инверсии данных МТ зондирования (R_{MT}). Для сравнения рассматривались возможности прогноза пористости с использованием эмпирической формулы Арчи [Archie, 1942]), вообще говоря, справедливой только для «чистых» песчаников (в отличие от более общей формулы Дахнова [1985]) и не учитывающей функциональные связи [Рыжов, Судоплатов, 1990] или априорные петрофизические модели [Глинских и др., 2014]:

$$R = R_f / (a K_{\Pi}^m), \quad (1)$$

где R — УЭС породы, R_f — УЭС флюида, K_{Π} — коэффициент открытой пористости. Согласно (Макеев и др., 2004 г.), принималось, что $R_f \approx 7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $m=1$, $a = 2/3$.

В каждом случае моделирование прогноза осуществлялось единым образом: синтезированные данные пористости рассматривались как исходные, прогноз осуществлялся на нижние половины скважин (в случае имитации прогноза на глубину) или в пункте расположения другой скважины (при имитации прогноза в межскважинном пространстве), а синтезированные данные пористости, не участвовавшие в прогнозе, использовались для сравнения результатов прогноза и оценки ошибок. При этом во всех случаях, кроме оценок по формуле Арчи, прогнозы осуществлялись с помощью обученных искусственных нейросетей «с учителем» [Хайкин, 2006], хорошо зарекомендовавших себя при решении задач геоэлектрики [Спичак, 2019].

Для того чтобы оценить точность прогноза коэффициента открытой пористости (ϕ), вычислялась средняя относительная ошибка (ε) по всей совокупности прогнозных значений:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_n (K_{\Pi n}^{est} - K_{\Pi n}^{true})^2}{\sum_n K_{\Pi n}^{true2}}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где n — номер точки прогноза пористости ($n = 1, \dots, N$), N — число точек прогноза, $K_{\Pi n}^{true}$ и $K_{\Pi n}^{est}$ — истинные и прогнозные значения коэффициента пористости в n -й точке соответственно.

ПРОГНОЗ ПОРИСТОСТИ НА ГЛУБИНЫ НИЖЕ ЗАБОЯ СКВАЖИН

Варианты прогноза. Для моделирования различных ситуаций использовались следующие варианты прогноза.

1. *Нейросетевой прогноз коэффициента K_{Π} в нижней половине скважины по синтезированной пористости в верхней половине и УЭС R_{MT} :*

– обучение ИНС на соответствии значений пористости K_{Π} и УЭС R_{MT} , заданных на одних и тех же глубинах из верхней половины скважины;

– прогноз коэффициента открытой пористости K_{Π} с помощью обученной ИНС в нижней половине скважины по данным УЭС R_{MT} , определенным на этих глубинах.

2. *Прогноз с помощью формулы Арчи:*

– осуществляется в нижней половине скважины по формуле Арчи (1) при $R = R_{MT}$.

3. *Нейросетевой прогноз коэффициента пористости K_{Π} в нижней половине скважины по синтезированной пористости в верхней половине и УЭС псевдоэлектрокаротажа (R_w^*):*

– обучение ИНС на данных K_{Π} и УЭС электрокаротажа R_w из верхней половины скважины;

– прогноз с помощью ИНС коэффициента открытой пористости K_{Π} в нижней половине скважины по прогнозному псевдоэлектрокаротажу R_w^* в нижней половине.

4. *Нейросетевой прогноз с помощью псевдоэлектрокаротажа и формулы Арчи:*

– прогноз пористости ϕ в нижней половине скважины по формуле Арчи (1), в которой $R = R_w^*$.

Важно отметить, что в этом и следующем разделах во всех вариантах обучения (кроме варианта 2) на входе нейросети используются удельные сопротивления и глубины, на которых они определены, а на выходе — соответствующие значения пористости на тех же глубинах. Иначе говоря, сети обучаются на соответствии $[z_i, R(z_i)] \leftrightarrow K_{\Pi}(z_i)$, где z_i — глубины, на которых определены значения R и ϕ в обучающей выборке. Аналогично, при прогнозе обученные нейросети используются для прогноза $K_{\Pi}(z_i)$ по данным $[z_i, R(z_i)]$, где z_i — глубины в области цели.

Результаты прогноза. На рисунке 3 и в табл. 1 приведены результаты модельных расчетов для обеих скважин во всех четырех вариантах прогноза, представленных выше.

Как видно из табл. 1, прогноз по данным УЭС R_{MT} с учетом данных электрокаротажа R_w (варианты 3 и 4) дает лучшие результаты, чем прогноз только по данным R_{MT} (варианты 1 и 2 соответственно). При этом в случае нейросетевого прогноза по приведенному выше алгоритму (вариант 3) средняя ошибка минимальна среди всех вариантов ($\varepsilon = 2.1 \%$).

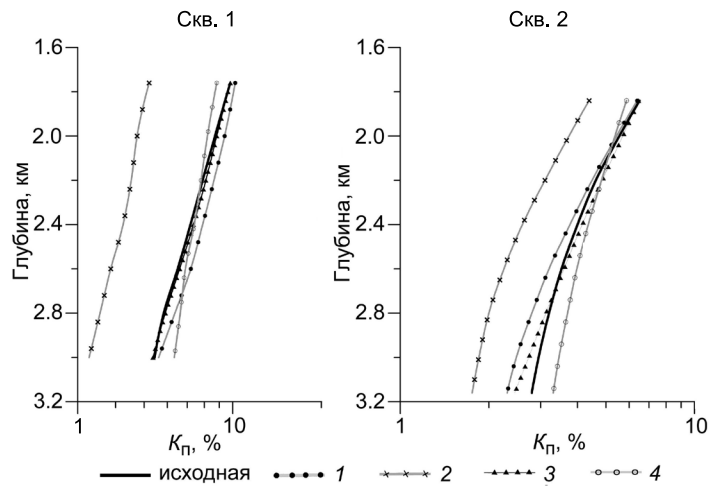
Сравнение результатов нейросетевого прогноза с оценками по формуле Арчи (ср. варианты 1, 2 и 3, 4) показывает, что применение

Таблица 1. Относительные ошибки (ε) прогноза коэффициента пористости K_{Π} (%) на нижнюю половину скважины

Скважина	Номер варианта			
	1	2	3	4
P1	7.8	43.6	1.4	8.1
P2	8.3	34.7	2.9	10.6
Средняя ошибка	8.0	39.1	2.1	9.3

Рис. 3. Графики прогнозных значений пористости на глубинах нижних половин скважин Р1 и Р2 в зависимости от выбранного варианта:

1 — по R_{MT} , 2 — по R_{MT} и формуле Арчи, 3 — по данным псевдоэлектрокаротажа R_w^* , 4 — по данным псевдоэлектрокаротажа R_w^* и формуле Арчи.



формулы Арчи (варианты 2 и 4) приводит к худшим результатам, причем не только по данным УЭС R_{MT} (вариант 2), что можно было ожидать, но и по данным электрокаротажа (вариант 4).

ПРОГНОЗ ПОРИСТОСТИ В МЕЖСКВАЖИННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Варианты прогноза. В зависимости от наличия или отсутствия электрокаротажа в пробуренных скважинах и УЭС, полученному с помощью инверсии данных магнитотеллурических зондирований в их окрестности, рассматривались следующие варианты прогноза:

1. *Нейросетевой прогноз по данным коэффициента пористости $K_{п}$ в пробуренных скважинах и УЭС, полученному с помощью инверсии данных магнитотеллурических зондирований в их окрестности (R_{MT}):*

- обучение ИНС на соотношении пористости и УЭС R_{MT} ;
- прогноз пористости с помощью обученной ИНС во второй скважине по данным УЭС R_{MT} в ее окрестности.

2. *Прогноз по данным R_{MT} и формуле Арчи:*

- прогноз пористости $K_{п}$ во второй скважине по формуле Арчи (1), в которой $R = R_{MT}$.

3. *Нейросетевой прогноз по данным коэффициента пористости ($K_{п}$) и псевдоэлектрокаротажа R_w^* :*

- обучение ИНС на данных пористости $K_{п}$ и УЭС электрокаротажа R_w ;
- прогноз с помощью ИНС пористости $K_{п}$ в пункте расположения второй скважины по прогнозируемому псевдоэлектрокаротажу R_w^* .

4. *Прогноз с помощью псевдокаротажа и формулы Арчи:*

- прогноз пористости $K_{п}$ во второй скважине по формуле Арчи (1), в которой $R = R_w^*$.

5. *Нейросетевой прогноз по данным коэффициента пористости $K_{п}$ и электрокаротажа R_w в пробуренных скважинах:*

- обучение ИНС на соотношении пористости и УЭС электрокаротажа R_w ;
- прогноз пористости во второй скважине по данным УЭС R_{MT} в ее окрестности.

Результаты прогноза. На рисунке 4 показаны графики прогнозных значений пористости в каждой из скважин в зависимости от использованного варианта, а в табл. 2 приведены относительные ошибки (ϵ) прогноза пористости по данным в «пункте наблюдения» (по результатам сравнения прогнозных и «истинных» (синтезированных) кривых пористости для каждой из скважин).

Из таблицы 2 видно, что максимальная средняя относительная ошибка прогноза пористости достигается при использовании варианта 2 (т. е. с применением формулы Арчи к данным УЭС, полученным в окрестности пункта прогноза), а минимальная (как и при прогнозе на глубину) — при использовании варианта 3 (т. е. по псевдоэлектрокаротажу в пункте прогноза, полученному, в свою очередь, с помощью приведенного выше нейросетевого алгоритма).

Таблица 2. **Относительные ошибки (ϵ) прогноза коэффициента пористости $K_{п}$ (%) в пунктах расположения скважин**

Скважина	Номер варианта				
	1	2	3	4	5
Р1	12.9	95.2	7.1	25.5	18.3
Р2	12.4	60.1	8.7	20.0	5.9
Средняя ошибка	12.7	77.7	7.9	22.8	12.1

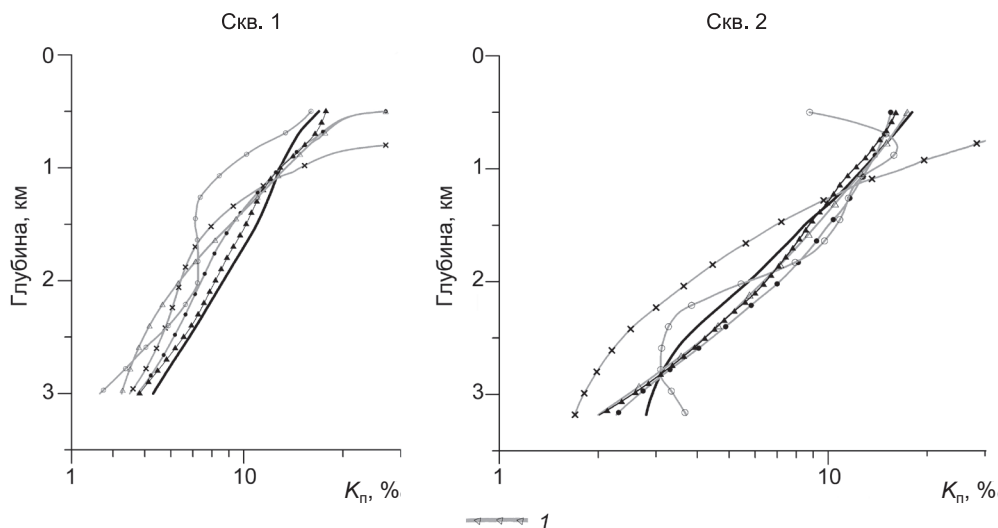


Рис. 4. Графики прогнозных значений пористости в пунктах расположения скважин P1 и P2 в зависимости от выбранного варианта:

l — по данным электрокаротажа $R_{и}$; остальные усл. обозн. см. на рис. 3.

Прогноз по вариантам 1 и 5 дает примерно одинаковые результаты. Иначе говоря, независимо от типа использованных для обучения ИНС данных, прогноз непосредственно по данным R_{MT} в точке прогноза решающим образом влияет на ошибку (причем в худшую сторону по сравнению с прогнозом по данным псевдоэлектрокаротажа).

Промежуточное значение средней ошибки прогноза в варианте 4 говорит о том, что несмотря на использование псевдоэлектрокаротажа, применение формулы Арчи увеличивает ошибку (хотя и не так сильно, как в варианте 2, когда она применяется непосредственно к данным УЭС R_{MT} , как это обычно происходит на практике).

В целом сравнение результатов нейросетевого прогноза с оценками по формуле Арчи (ср. варианты 1, 2 и 3, 4) показывает, что, как и при прогнозе пористости на глубину, применение формулы Арчи (варианты 2 и 4) приводит к худшим результатам, причем не только по данным УЭС R_{MT} (вариант 2), что можно было ожидать, но и по данным псевдоэлектрокаротажа (вариант 4).

ВЫВОДЫ

На основании полученных результатов моделирования прогноза пористости можно сделать следующие выводы.

Точность прогноза пористости на глубину только по данным УЭС R_{MT} находится примерно на том же уровне, что и в другом геологическом регионе [Спичак, Захарова, 2015] и составляет в среднем 8 %. Несколько меньшая относительная точность (в среднем 13 %) достигается при прогнозе пористости в межскважинном пространстве.

Прогноз по данным электромагнитных зондирований (не обязательно МТ) в окрестности скважин по предложенному алгоритму построения псевдоэлектрокаротажа открывает путь для более точной оценки пористости на глубинах ниже забоя скважин (средняя относительная ошибка при прогнозе на удвоенную глубину порядка 2 %), а также в пространстве между ними (средняя относительная ошибка порядка 8 %). Учитывая, что эти оценки получены на основании данных всего одной скважины, можно рассчитывать, что они улучшатся при наличии большего количества как самих скважин, так и пунктов МТЗ в их окрестности.

Важно отметить, что применение известной формулы Арчи дает худшие результаты, причем как при прогнозе по данным электромагнитных зондирований, так и по данным электрокаротажа. С одной стороны, это связано с использованием упрощенной эмпирической формулы, не учитывающей сложных связей между удельным сопротивлением пород и пористостью. С другой стороны, при прогнозе фильтрационно-емкостных свойств пород вне скважин в областях с заранее неизвестной литологией использование таких формул, основанных на установлении корреляции рассматриваемых параметров в

других условиях и, вообще говоря, в других областях, всегда рискованно. В то же время применение предложенного нейросетевого подхода не требует высокой корреляции используемых данных.

Авторы выражают глубокую благодарность д.г.-м.н. А.В. Поспееву и анонимному рецензенту, замечания и комментарии которых позволили улучшить статью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-17-00155).

ЛИТЕРАТУРА

Глинских В.Н., Нестерова Г.В., Эпов М.И. Моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа с использованием петрофизических моделей электропроводности // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (5—6), с. 1001—1010.

Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. М., Недра, 1985, 310 с.

Копилевич Е.А., Сурова Н.Д. Методика прогнозирования фильтрационных свойств коллекторов по данным сейсморазведки // Геофизика, 2012, № 1, с. 20—26.

Лесик О.М. Глубинное строение Фрунзенского прогностического полигона: Автореф. дис. ...к.г.-м.н. Фрунзе, Ин-т сейсмологии АН СССР, 1988, 24 с.

Рыбин А.К., Спичак В.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Площадные магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика, 2008, т. 40 (5), с. 445—460.

Рыжов А.А., Судоплатов А.Д. Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. М., Недра, 1990, с. 27—41.

Спичак В.В. Электромагнитная томография земных недр. М., Научный мир, 2019, 374 с.

Спичак В.В., Захарова О.К. Прогноз пористости на глубину ниже забоя скважин по данным электромагнитных зондирований и электрокаротажа // Геофизика, 2015, № 6, с. 53—67.

Хайкин С. Нейронные сети. М., ООО «И.Д. Вильямс», 2006, 1104 с.

Юдахин Ф.Н. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. Фрунзе, Илим, 1983, 248 с.

Archie G.E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // Am. Inst. Mining Metall. Eng. Trans., 1942, v. 146, p. 54—62.

Dolberg D.M., Helgesen J., Hanssen T.H., Magnus I., Saigal G., and Pedersen B.K. Porosity prediction from seismic inversion, Lavrans Field, Halten Terrace, Norway // The Leading Edge, 2000, № 4, p. 392—399.

Kalkomey C.T. Potential risks when using seismic attributes as predictors of reservoir properties // The Leading Edge, 1997, № 3, p. 247—251.

Pan R., Ma X. An approach to reserve estimation enhanced with 3-D seismic data // Renewable Resour., 1997, v. 6 (4), p. 251—255.

Spichak V., Zakharova O., Rybin A.L. Methodology of the indirect temperature estimation basing on magnetotelluric data: northern Tien Shan case study // J. Appl. Geophys., 2011, v. 73, p. 164—173.

Swift C.M. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States. Ph. D. Thesis. Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology, 1967, 211 p.