

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ГЕОТЕРМОМЕТРА ДЛЯ ПОИСКА УГЛЕВОДОРОДОВ НА ГЛУБИНАХ НИЖЕ ЗАБОЯ СКВАЖИН**

В.В. Спичак, О.К. Захарова  
Центр геоэлектромагнитных исследований ИФЗ РАН, Москва,  
e-mail: v.spichak@mail.ru

### **Введение**

Термодинамические расчеты и экспериментальные исследования (см., например, [1, 2]) позволили выявить закономерности высвобождения внутренней энергии органического вещества вследствие экзотермических реакций в процессе нефтегазообразования. Согласно полученным результатам соответствующая пластовая температура может превышать нормальную, в среднем, на 12–14 °С, а по максимальным значениям – до 30–40 °С. Поэтому по температурной модели участка недр можно делать выводы о возможном наличии залежей углеводородов (см., например, [3]), расположении нефтяного окна [4] и зрелости нефтематеринских пород [5].

Построение такой модели можно осуществить с помощью методики косвенного электромагнитного геотермометра [6], позволяющей делать оценки температуры по данным наземного электромагнитного зондирования и имеющимся геотермам. В частности, использование концепции электромагнитного геотермометра позволяет с хорошей точностью оценивать температуры на глубинах, существенно превышающих глубины пробуренных скважин, в которых есть температурные данные. При этом, например, при прогнозе на глубину, превышающую глубину скважины вдвое, относительная ошибка составляет, в среднем, 5–6%, а при превышении глубины втрое – примерно 20% [7].

С другой стороны, прогноз температур на глубины, превышающие глубину пробуренных скважин, можно осуществлять и непосредственно в процессе поэтапного бурения (Forecast-While-Drilling – FWD) [8]). Ниже мы проведем оценку точности прогноза в двух вариантах: «прогноз после бурения» и «прогноз в процессе поэтапного бурения», используя электромагнитные и температурные данные, измеренные на заброшенном нефтяном поле Сульц-су-Форе (Эльзас, Франция), где сейчас проводятся работы по поиску источников геотермальной энергии.

## Геологические сведения

Область Сульц-су-Форе расположена в пределах Верхне-Рейнского грабена (рис. 1), который является частью европейской кайнозойской рифтовой системы, простирающейся от Средиземноморского побережья до предгорья Альп. Геотермальные скважины расположены внутри Верхне-Рейнского грабена и локально проникают в так называемый Сульцевский горст, составленный из осадков кайнозойской и мезозойской формаций (от Триаса до средней Юры), лежащих на палеозойском кристаллическом фундаменте.

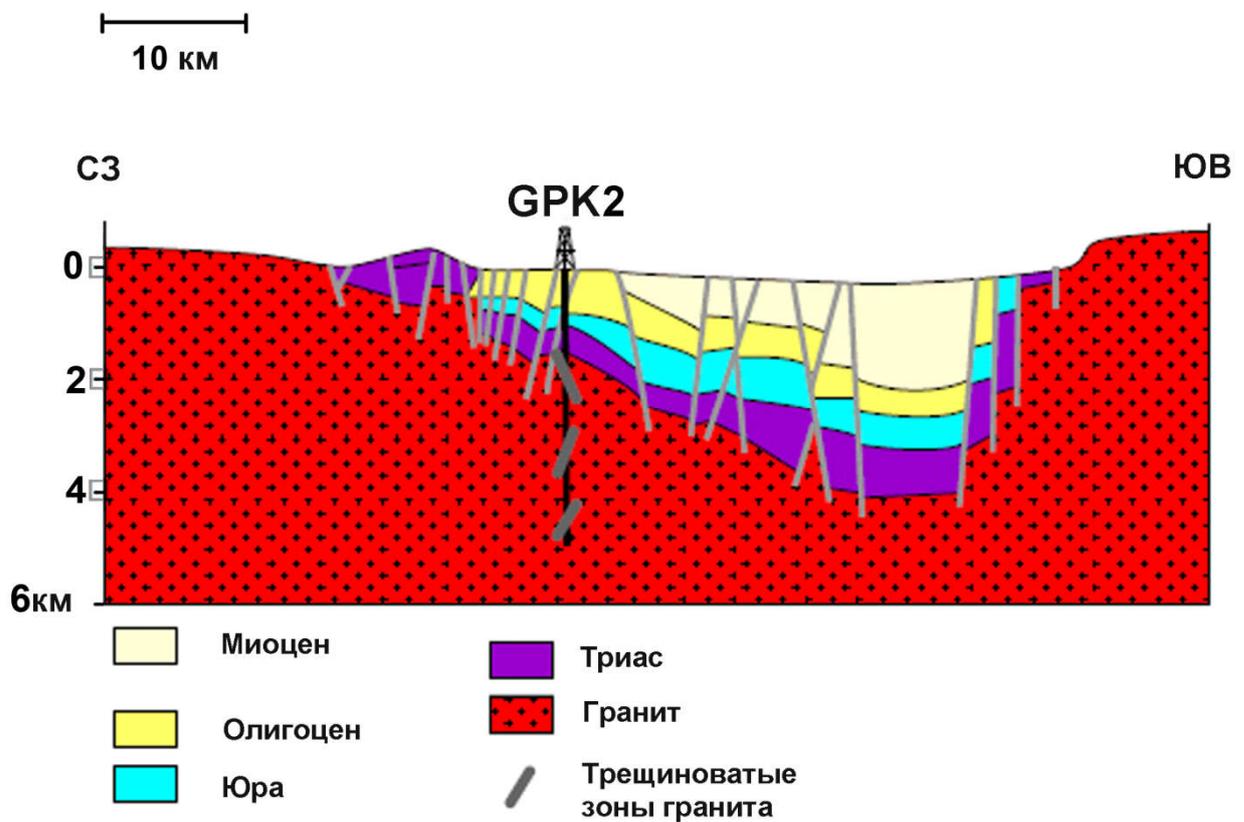


Рис. 1. Геологический разрез Верхне-Рейнского грабена

## Электромагнитный геотермометр

Как известно, удельное электрическое сопротивление пород зависит, в числе прочих параметров, от температуры (см., например, обзор [9]). Поэтому оно может использоваться как прокси-параметр для косвенной оценки температуры на тех участках земных недр, где отсутствуют ее прямые измерения, в частности, на больших глубинах.

Авторами был предложен подход к оценке температуры на глубинах, превышающих глубину пробуренных скважин, с помощью электромагнитного геотермометра [6] (см. примеры его применения в монографии [7]). Он основан на построении глубинной модели удельного электрического сопротивления по данным наземного электромагнитного (в частности, магнитотеллурического) зондирования в окрестности скважины и последующем применении нейросетевого подхода для прогноза температуры на глубине с помощью искусственной нейросети, обученной на соответствии измеренных скважинных температурных данных и модельных значений удельного сопротивления.

### **Температурные и электромагнитные данные**

В процессе эксплуатации нефтяного месторождения Пехельбронн, расположенного в этом районе, было проведено около 500 глубинных температурных измерений. При этом самая глубокая скважина GPK2 (см. ее расположение на рис. 1) бурилась в три приема: сначала до глубины 2000 м, затем до глубины 3878 м и, наконец, до глубины 5046 м.

Для прогноза температуры в этой и других скважинах, помимо термокаротажа, использовались результаты инверсии магнитотеллурических данных, измеренных с помощью аппаратуры фирмы METRONIX в диапазоне частот от 0.001 до 1000 Гц. При этом регистрация измерений проводилась по технологии удаленной базовой точки, расположенной на расстоянии 200 км. Для прогноза мы использовали вертикальные профили удельного электрического сопротивления из построенной 2D модели [10], ближайšie к скважинам.

### **Моделирование электромагнитного прогноза температуры после бурения разведочных скважин**

Для моделирования ситуации, когда прогноз температуры на больших глубинах выполняется после бурения скважин, мы провели оценку температуры на глубинах ниже забоя скважин по технологии электромагнитного геотермометра [6]. При этом его калибровка выполнялась по соответствию между удельными электрическими сопротивлениями, полученными по результатам магнитотеллурического зондирования в окрестности скважин и температурными измерениями в скважинах на тех же глубинах. Результаты прогноза температуры в 6 скважинах рассматриваемого участка показаны на рис. 2. Заштрихованные области показывают области неопределенности прогнозных значений температуры, которые могли бы возникнуть в результате искусственно добавленной 10%-ной погрешности при оценке удельного электрического сопротивления. В целом, если прогнозная глубина не более, чем вдвое превышает глубину пробуренной

скважины, средняя относительная ошибка прогноза температуры остается в пределах 10% [10].

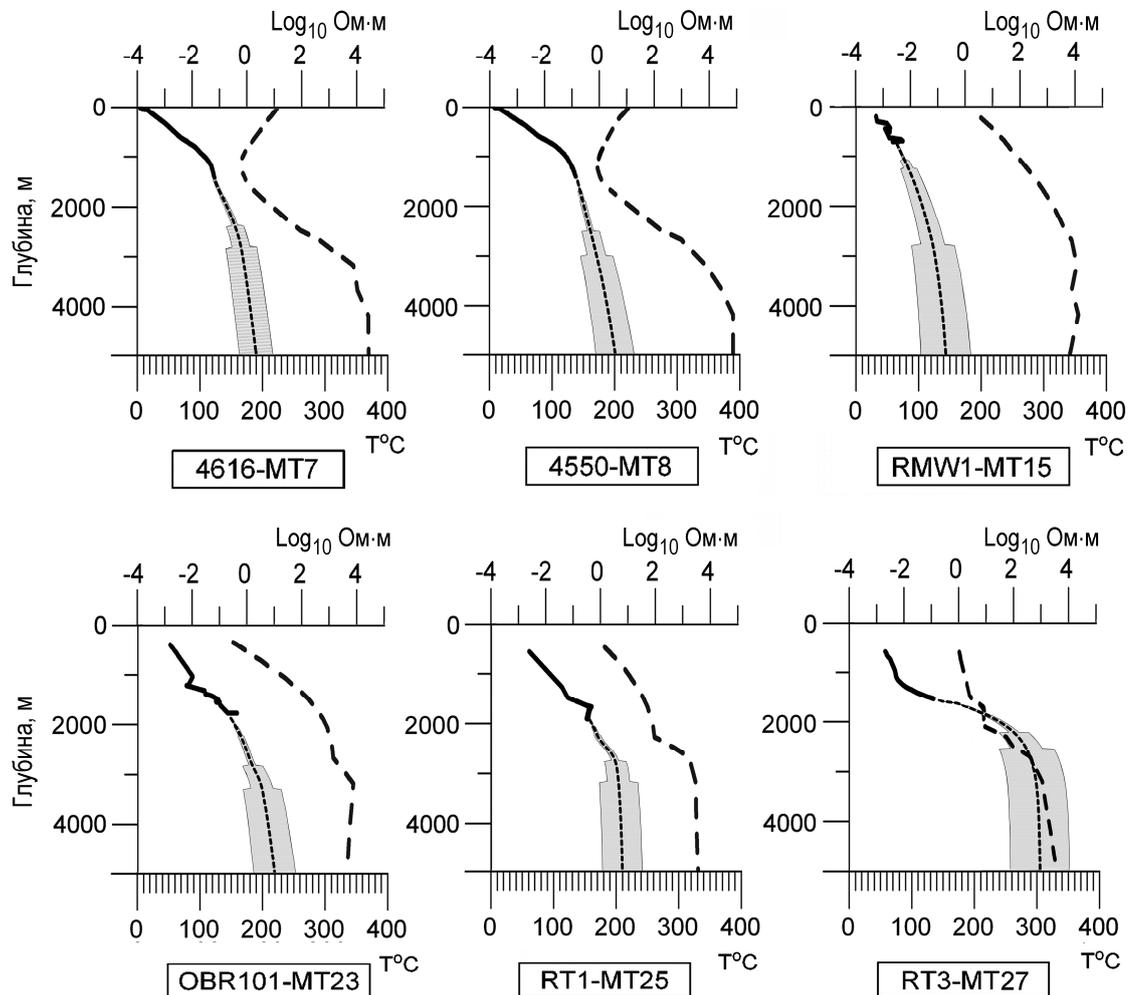


Рис. 2. Прогноз температуры на глубину 5 км по технологии электромагнитного геотермометра. Сплошные линии – геотермы; пунктирные линии – прогнозная температура; штриховые линии – графики удельного электрического сопротивления, полученные в результате инверсии магнитотеллурических данных; заштрихованные области – неопределенность прогноза температуры при добавлении искусственных 10%-ных помех к удельному электрическому сопротивлению

### Моделирование электромагнитного прогноза температуры в процессе поэтапного бурения

Для моделирования прогноза температуры в этом режиме мы использовали ретро-прогноз температуры на глубину в самой глубокой скважине GPK2. Он осуществлялся в два этапа, соответствующих разделенным во времени этапам бурения скважины: сначала

на глубине 2000 м делался прогноз на интервал 2000–3878 м, а затем на глубине 3078 м – на интервал 3078–5046 м.

Оценка точности прогноза температуры осуществлялась так, как будто прогноз температуры на каждый следующий интервал глубин проводился на основе использования предыдущего термокаротажа и профиля удельного электрического сопротивления, построенного на всю прогнозную глубину (5000 м) заранее. Для этого прогнозные температуры для каждого этапа последовательно сравнивались с реально измеренными значениями на соответствующих интервалах глубин.

На рис. 3 показаны результаты такого прогноза в сравнении со скважинными температурными измерениями. Относительная ошибка прогноза, сделанного на глубине 2000 м, на последующий интервал (2000–3878 м) составила 1.8%, а относительная ошибка прогноза, сделанного на глубине 3878 м, на интервал глубин от 3878 до 5046 м составила всего лишь 0.4%. Для сравнения на том же рисунке показана прогнозная кривая температуры, построенная по результатам ее моделирования в предположении знания коэффициента теплопроводности пород и теплового потока на поверхности [11]. Как видно из ее сравнения с измеренной температурой, относительные ошибки такого прогноза могут достигать 100%.

Следует отметить, что более высокая точность электромагнитного прогноза на большей глубине объясняется более благоприятным соотношением интервалов глубин, использованных для калибровки и прогноза. Это особенно заметно из сравнения точности прогноза в режиме поэтапного бурения (рис. 3) с точностью прогнозов, сделанных по окончании бурения (см. рис. 2).

### **Выводы**

Применение технологии электромагнитного геотермометра позволяет делать прогноз температуры на больших глубинах по результатам бурения разведочных скважин. Если предположить, что на исследуемой глубине температура составляет, например, 100 °С, то достигаемая относительная точность прогноза (6–10%) позволяет выделить аномалии, связанные с генерацией углеводородов, превышающие 10 °С.

При поэтапном бурении решение о его продолжении осуществляется на основе прогноза температуры на следующий интервал глубин. При этом относительная ошибка прогноза при соотношении промежуточной глубины забоя и прогнозной глубины один к двум составляет менее 2% и, как это ни парадоксально звучит, с глубиной уменьшается.

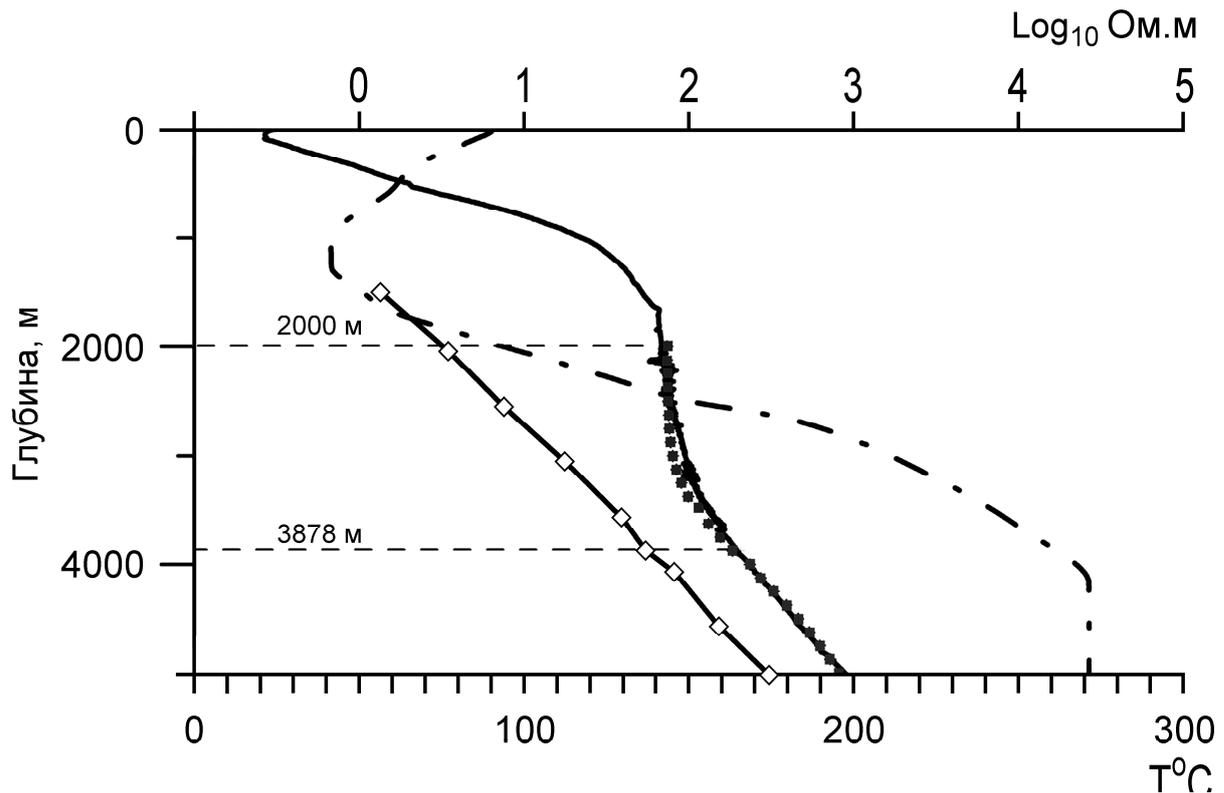


Рис. 3. Результаты моделирования прогноза температуры в режиме FWD по технологии электромагнитного геотермометра: сплошная линия – измеренная температура; линия с черными квадратами – электромагнитный прогноз температуры; линия с белыми квадратами – результат моделирования температуры по данным теплового потока; штрих-пунктирная линия – график удельного электрического сопротивления, полученный по результатам инверсии магнитотеллурических данных в соседнем со скважиной пункте

Этот вывод делает применение технологии поэтапного бурения с промежуточными прогнозами температуры на глубину незаменимым инструментом для принятия решения о его продолжении. В свою очередь, это позволяет, во-первых, оптимизировать сам процесс разведочного бурения и, во-вторых, существенно сократить расходы на его проведение.

Наконец, показано, что точность прогноза температуры с помощью электромагнитного геотермометра (как по результатам бурения, так и, в еще большей степени, в режиме поэтапного бурения) достаточна для выявления аномалий температуры, связанных с генерацией углеводородов органического происхождения. Анализ соответствующего разреза температуры мог бы позволить сделать выводы о возможном наличии залежей углеводородов, расположении нефтяного окна и зрелости нефтематеринских пород.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Курчиков А.Р.* Гидрогеотермические критерии нефтегазоносности. М.: Недра. 1992. 231с.
2. *Неручев С.Г., Rogozina E.A.* Роль внутренней энергии органического вещества осадочных пород в процессах его геохимического преобразования // Разведка и охрана земных недр. 2010. № 4. С. 5–10.
3. *Подгорных Л.В., Хуторской М.Д., Грамберг И.С., Леонов Ю.Г.* Трехмерная геотермическая модель Карского шельфа и прогноз нефтегазоносности // ДАН. 2001. № 2. С. 228–232.
4. *Спичак В.В.* Применение электромагнитных методов для поиска, разведки и мониторинга залежей углеводородов // Геофизика. 2017. № 6. С 33–43.
5. *Roussé S., Filleaudeau P-Y., Mermu G.C., Letteron A. and Schaming M.* Integrated Stratigraphic and Petroleum System Modeling Study of the Southern Upper Rhine Graben // Proc. AAPG/SEG International Conference and Exhibition. Barcelona, Spain. 2016. p. 11–16.
6. *Спичак В.В., Захарова О.К.* Пат. RU 2326413 С1. Способ оценки температуры в недрах Земли. № 2006131399/28; Заявл. 01.09.2006; Опубл. 10.06.2008 // Изобретения. Полезные модели. 2008. Бюл. № 16. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>.
7. *Спичак В.В., Захарова О.К.* Электромагнитный геотермометр. М.: Научный мир, 2013. 172 с.
8. *Spichak V.V.* A new strategy for geothermal exploration drilling based on using of an electromagnetic sounding data // Expanded Abstr. Int. Workshop on High Entalphy Geothermal Systems. San-Bernardino, California. 2013. P. 217–222.
9. *Спичак В.В.* Электромагнитное зондирование геотермальных зон: новые горизонты // Геофизика. 2008. № 1. С. 50–67.
10. *Spichak V., Geiermann J., Zakharova O., Calcagno P., Genter A. and Schill E.* Estimating deep temperatures in the Soultz-sous-Forêts geothermal area (France) from magnetotelluric data // Near Surface Geophysics. 2015. Vol. 13(4). P. 397–408.
11. *Kohl T. and Pribnow D.* Constraints for deep fluid circulation at the HDR site Soultz by new thermal data from 5km depth // Proc. AGU Fall meeting. San Francisco, California. 1999. P. 166–169.