УДК 550.837+550.832.7+550.822.7+553.048+539.217.1

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРОГНОЗ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВНЕ СКВАЖИН

© 2022 г. В.В. Спичак, О.К. Захарова

Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия Автор для переписки: В.В. Спичак (e-mail: v.spichak@mail.ru)

Результаты проведённых модельных исследований говорят о том, что электропроводность можно считать хорошим прокси-параметром для оценки проницаемости пород как в самих скважинах, так и в пространстве между ними. Показано, что точность нейросетевого прогноза проницаемости по электромагнитным данным существенно зависит от соотношения глубины скважины и целевой глубины. Например, прогноз проницаемости на удвоенную глубины скважины осуществляется с относительной ошибкой 2.5–7 % в зависимости от степени трещиноватости пород. В то же время, относительная ошибка прогноза усреднённой проницаемости при таком же соотношении глубин может составлять 1–2 %. По результатам инверсии магнитотеллурических данных построен двумерный разрез проницаемости геотермальной области Сульц-су-Форе (Франция) до глубины 5 км. Его анализ позволил выявить проницаемые трещиноватые зоны, перспективные для разведочного бурения.

Ключевые слова: проницаемость, прогноз, электропроводность, трещиноватость, скважина, искусственная нейросеть.

Введение

Знание расположения возможных каналов транспортировки флюидов, часто совпадающих с зонами макротрещиноватости, позволяет планировать разработку геотермальных ресурсов. О трещиноватости судят на основе анализа образцов породы, извлекаемых из пробуренных скважин, а также нескольких высокоразрешающих методов просвечивания скважин (см., например, [Genter et al., 2010]). Пространственная экстраполяция обнаруженных кластеров допускает построение модели трещиноватых зон, в которых можно предположить наличие каналов циркуляции гидротермальных флюидов в масштабах резервуара [Dezayes, Genter, Hooijkaas, 2005; Dezayes, Genter, Valley, 2010; Sausse et al., 2010; Vidal et al., 2015; Vidal, Genter, Schmittbuhl, 2015; Vidal, Genter, Chopin, 2017; Vidal, Genter, 2018]. Однако не все трещиноватые зоны могут служить каналами для потока флюидов. Проницаемость существенно зависит от геометрии и связности пор, размеров, степени их закупорки и плотности, характера заполняющего поры флюида, эффективного внешнего давления, эластических свойств пород, температуры. Более того, она анизотропна и, по-существу, представляет собой тензор второго ранга [Bear, 1972; Manning, Ingebritsen, 1999]. Несмотря на сложный характер зависимости проницаемости от перечисленных факторов (см., например, [Кобранова, 1986; Шмонов, Витовтова, 2017]), её часто оценивают исходя из связи с пористостью пород. Для этого используют эмпирические формулы, отличающиеся коэффициентами линейной зависимости lgK от lg ϕ (где K – проницаемость, а ϕ – пористость), выведенными методом регрессионного анализа имеющихся данных скважинных измерений [Katz, Thompson, 1986; Ma, Morrow, 1996; Díaz-Curie, Biosca, Miguel, 2016]. Но такие формулы не носят общий характер и, кроме того, применимы только для неконсолидированных песчаников [Beard, Weyl, 1973]. Например, в одних случаях образцам с низкой пористостью может соответствовать относительно высокая проницаемость, а в других, наоборот, образцам с высокой пористостью может соответствовать относительно низкая проницаемость (см., например, [*Ma, Morrow,* 1996; *Heap et al.,* 2017]). Отсутствие корреляции связано с тем, что на пористость и проницаемость по-разному влияют такие факторы, как содержание глины, осадконакопление, диагенетическое развитие и др. Поэтому соответствующие эмпирические формулы можно применять, главным образом, для восполнения недостающих данных проницаемости в тех же скважинах или при такой же литологии, которая редко бывает известна заранее.

С другой стороны, поскольку на движение ионов во флюидах влияют те же параметры, что и на проницаемость, то можно ожидать, что между ней и удельным электрическим сопротивлением (или электропроводностью, являющейся обратной ей величиной) пород также существует эмпирическая зависимость. Например, в работе [*Brace, Walsh, Frangos,* 1968] на основании исследования связи проницаемости и удельного сопротивления гранитов при давлениях от 5 до 400 МПа была установлена линейная зависимость между lgK и lgR (где R – удельное электрическое сопротивление), которая, как и эмпирическая связь между lgK и lg ϕ , не может считаться универсальной и зависит от типов пород [*Latt, Giao,* 2017; *Da Rocha, Da Costa, Carrasquilla,* 2021]. В то же время, электрическое сопротивление более чувствительно к типу и объёму флюидов, чем акустический импеданс, который часто используется для оценки проницаемости (см. обзор [*Cnuчак,* 2017]).

Для более надёжного прогноза проницаемости в скважинах оперируют результататами всех имеющихся каротажных данных [Huang et al., 1996; Helle, Bhatt, Ursin, 2001; Bhatt, Helle, 2002; Aminian, Ameri, 2005; Lim, 2003; Verma et al., 2012; Wang, Wang, Chen, 2013; Urang et al., 2020]. В этих целях применяют аппарат искусственных нейросетей (ИНС), хорошо зарекомендовавших себя при решении нелинейных задач геофизики, интерполяции и экстраполяции данных, а также для того, чтобы делать выводы на основе неполных и зашумлённых данных. Основы этого подхода изложены в статье [Хайкин, 2006]. Между тем, прогноз проницаемости в масштабах резервуара геотермальной энергии, который чрезвычайно важен для его эффективной эксплуатации, на сегодняшний день не имеет удовлетворительного решения. В работе [Спичак, Захарова, 2015] был предложен новый подход к оценке фильтрационно-ёмкостных свойств резервуара по результатам его электромагнитного зондирования и каротажным данным, измеренным на образцах пород. Тот же подход был применён для построения разреза температуры по данным магнитотеллурических (МТ) зондирований в Сульц-су-Форе [Spichak et al., 2015]. Другие примеры его применения представлены в монографиях [Спичак, Захарова, 2013; Спичак, 2019].

В настоящей работе исследованы возможности упомянутого подхода для оценки проницаемости на глубинах, бо́льших глубины пробуренных скважин, и в пространстве между ними с использованием данных измерений проницаемости на образцах пород в скважине *EPS*1, которая расположена в геотермальной области Сульц-су-Форе (Эльзас, Франция), а также результатов инверсии данных МТ зондирований вдоль профиля, проходящего в окрестности геотермальных скважин.

Геология и литология

Район Сульц-су-Форе расположен во французской провинции Эльзас в пределах Верхне-Рейнского грабена, который представляет собой часть европейской кайнозойской рифтовой системы, простирающейся в предгорья Альп от Средиземноморского побережья до Северного моря (рис. 1).



Рис. 1. Местоположение геотермальной области Сульц-су-Форе и геология Верхне-Рейнского грабена (по [*Haenel et al.*, 1979] с изменениями): I – кайнозойские осадки; 2 – кайнозойские вулканогенные породы; 3 – юрские отложения; 4 – триасовые отложения; 5 – герцинский фундамент; 6 – граничные разломы; 7 – распределение температур в °C на глубине 1500 м; 8 – локальные термальные аномалии. AB – субширотный профиль, пересекающий область Сульц-су-Форе. На врезке – упрощённый разрез по профилю AB (по [*Dezayes, Genter, Hooijkaas*, 2005] с изменениями): I – кайнозойские заполняющие осадки; II – мезозойские осадки; III – гранитное основание. Стрелками показано расположение скважин *EPS*1 и *GPK*1

Fig. 1. Location of the geothermal area of Soultz-sous-Forêts and geology of the Upper Rhine graben (according to [*Haenel et al.*, 1979] with changes): I – Cenozoic sediments; 2 – Cenozoic volcanogenic rocks; 3 – Jurassic deposits; 4 – Triassic deposits; 5 – Hercynian basement; 6 – boundary faults; 7 – temperature distribution in °C at a depth of 1500 m; 8 – local thermal anomalies. *AB* is the sublatitudinal profile crossing Soultz-sous-Forêts region. The inset shows a simplified section along profile *AB* (according to [*Dezayes, Genter, Hooijkaas,* 2005] with changes): I – Cenozoic filling sediments; II – Mesozoic sediments; III – granite basement. The arrows mark the positions of the *EPS*1 and *GPK*1 wells

Осадочный разрез исследуемой области представлен мезозойскими отложениями (триас – средняя юра), залегающими на герцинском фундаменте, сложенном порфиритовыми гранитами. Как мезозойские породы, так и граниты пронизаны системой меридиональных разломов с западным или восточным падением, близким к вертикальному. Формирование Рейнского грабена происходило сначала под воздействием североюжного (меридионального) сжатия (эоцен), за которым последовала существенная фаза западно-восточного (широтного) растяжения в олигоцене. Именно фазой растяжения обусловлено большинство наблюдаемых структур и фактическая геометрия разломов [Dezayes, Genter, Hooijkaas, 2005].

21

В 1980-х гг. в районе Сульц-су-Форе ряд нефтяных компаний проводил бурение разведочных скважин, в которых выполнялись каротажные измерения и отбирался керн. В частности, из скважины *EPS*1 был извлечён керн, петрографический анализ которого выявил типичный гранитный состав породы на глубинах более 1400 м [*Vernoux et al.*, 1995]. В соседней скважине *GPK*1 на глубине около 1400 м обнаружены сильно трещиноватые (от микротрещин до разломов) и различные по петрографическому составу массивы гранитов: серые порфиритовые монцонит-граниты и серые мелкозернистые двухслюдяные граниты. В интервале глубин 1420–1570 м прослежены порфиритовые граниты с локальными признаками палеовыветривания [*Ledesert et al.*, 2010; *Rosener*, 2007]. На глубинах 1600–1850 м наблюдалась сильная утечка бурового раствора, истечение газа и пластовых вод [*Vuataz et al.*, 1990], что свидетельствует о наличии множества пустот в гранитных породах.

Данные

Магнитотеллурические зондирования. В представленной работе использовались результаты магнитотеллурических зондирований, проведённых в 2007–2008 гг. [Geiermann, Schill, 2010] вдоль 13-километрового субширотного профиля AB, пересекающего область Сульц-су-Форе (см. рис. 1). Эти данные были получены с помощью аппаратуры фирмы METRONIX в диапазоне частот от 0.001 до 1000 Гц. Среднее расстояние между пунктами составляло около 800 м. Регистрация измерений при этом выполнялась по технологии удалённой базовой точки, расположенной на расстоянии 200 км. Анализ МТ данных, реализованный в работе [Geiermann, 2009], показал, что для диапазона периодов вплоть до 40 с характерна одно- и двухмерность, в то время как поведение кривых импеданса на больших периодах свидетельствуют о трёхмерности на больших глубинах. Двухмерность геологической структуры вплоть до глубин 8-10 км подкреплена ориентацией границы локального грабена, а также другими геофизическими данными [Schill, Geiermann, Kümmritz, 2010]. В работах [Geiermann, Schill, 2010; Spichak et al., 2015] была осуществлена 2D бимодальная инверсия МТ данных, результаты которой были отнесены к профилю, перпендикулярному к направлению простирания пласта (рис. 2).

Рис. 2. Схематическая карта области Сульц-су-Форе по [*Spichak et al.*, 2015]. Штриховая линия – борт Рейнского грабена; кружки – проекции вертикальных профилей удельного сопротивления на поверхность; пунктирные линии – проекции пунктов расположения скважин на МТ профиль; треугольники – ближайшие к профилю скважины

Fig. 2. Schematic map of the Soultz-sous-Forêts region according to [*Spichak et al.*, 2015]. The dashed line is the side of the Rhine graben; circles are projections of vertical resistivity profiles onto the surface; dotted lines are projections of well locations on the MT profile; triangles are wells closest to the profile





Разрез удельного сопротивления R вдоль указанного профиля до глубины 5 км, проходящий через пробуренные ранее геотермальные скважины *EPS*1 и *GPK*1, был построен на сетке с шагом 100 м по горизонтали и 25 м по вертикали (рис. 3). Профили электропроводности σ из этого разреза, ближайшие к скважинам *EPS*1 и *GPK*1, которые были использованы для прогнозов проницаемости, приведены на рис. 4.



Рис. 3. Разрез логарифма сопротивления вдоль профиля (см. рис. 2, линия с кружками) по [Spichak et al., 2015]. Над разрезом показано расположение скважин *GPK*1 и *EPS*1; вертикальные отрезки – глубина бурения; утолщённый отрезок – глубины, на которых проводились исследования

Fig. 3. Section of the logarithm of resistance along the profile (see Fig. 2, line with circles) according to [*Spichak et al.*, 2015]. The location of wells *GPK*1 and *EPS*1 is shown above the section; vertical segments – drilling depth; thickened segment – the depths at which the research was carried out

Проницаемость и пористость. В экспериментах анализировались данные проницаемости неповреждённых (K_{in}) и искусственно повреждённых (трещиноватых) (K_{fr}) образцов породы в скважине *EPS*1 на глубинах осадочного чехла 1006–1417 м [*Kushnir, Heap, Baud,* 2018], а также данные проницаемости неповреждённых образцов на глубинах гранитного фундамента 1420–2161 м [*Geraud et al.,* 2010] (см. рис. 4). Как видно на рис. 4, диапазоны изменения K_{in} и K_{fr} составляют примерно $10^{-20}-10^{-14}$ и $10^{-13}-10^{-11}$ м², соответственно.

В наших исследованиях рассматривались также данные пористости ф из скважины *EPS*1 [*Ledesert et al.*, 2010; *Rosener*, 2007; *Surma, Geraud*, 2003] (см. рис. 4). Коэффициент пористости определялся методом ртутной порометрии образцов керна на различных глубинах от 1000 до 2200 м и изменялся примерно от 2 до 13 %. Его сглаженный график, использованный в работе, приведён на рис. 4.



Рис. 4. Исходные данные: профили пористости φ в скважине *EPS*1 по данным [*Ledesert et al.*, 2010; *Rosener*, 2007]; профили логарифма электропроводности $\lg \sigma_{EPS1}$ и $\lg \sigma_{GPK1}$, соседние со скважинами *EPS*1 и *GPK*1 по [*Spichak et al.*, 2015]; объединённый профиль логарифма проницаемости $\lg K_{in}$ для скважины *EPS*1, созданный из значений для неповреждённых образцов в осадочном чехле по [*Kushnir, Heap, Baud*, 2018] и кристаллическом фундаменте (черные кружки) по [*Geraud et al.*, 2010]; профиль логарифма проницаемости трещиноватых образцов $\lg K_{fr}$ (кружки без заливки) по [*Kushnir, Heap, Baud*, 2018]. Штриховые линии – усреднённые значения; пунктирная линия – условная граница, разделяющая осадочный чехол и фундамент. Литологическая колонка: 1 – пестроцветный песчаник; 2 – порфиритовые монцонит-граниты; 3, 4 – граниты с прожилками слюды: мелкозернистые (3), гидротермально изменённые (4)

Fig. 4. Initial data: porosity profiles φ in well *EPS*1 according to [*Ledesert et al.*, 2010; *Rosener*, 2007]; electrical conductivity logarithm profiles \lg_{GPS1} and \lg_{GPK1} adjacent to wells *EPS*1 and *GPK*1 according to [*Spichak et al.*, 2015]; combined permeability logarithm profile $\lg_{K_{in}}$ for well *EPS*1, created from values for intact samples in the sedimentary cover according to [*Kushnir, Heap, Baud*, 2018] and the crystalline basement (black circles) according to [*Geraud et al.*, 2010]; profile of the logarithm of the permeability of fractured samples $\lg_{K_{fr}}$ (circles without filling) according to [*Kushnir, Heap, Baud*, 2018]. Dashed lines are averaged values; the dotted line is a conditional boundary separating the sedimentary cover and the basement. Lithological column: 1 – variegated sandstone; 2 – porphyritic monzonite-granites; 3, 4 – granites with mica veins: fine-grained (3), hydrothermally altered (4)

Кросс-плоты для скважины *EPS*1 построены по измеренным только в осадочном чехле данным и приведены на рис. $5 - \lg K_{in}, K_{fr}/\varphi$ (*слева*) и $\lg K_{in}, K_{fr}/\lg \sigma_{EPS1}$ (*справа*). На рис. 5, *слева* видно, что между проницаемостью K_{in} и пористостью φ наблюдается хорошая корреляция (коэффициент корреляции равен 0.85). Это оправдывает построение линейной регрессии, основанной на методе наименьших квадратов

$$\lg K_{in} = 0.362\varphi - 19.970,\tag{1}$$

которая также использовалась для прогнозов. В то же время, корреляция значений проницаемости трещиноватых пород K_{fr} со значениями электропроводности и пористости невысока (коэффициенты корреляции между указанными величинами составляют –0.175 и –0.167, соответственно).



Рис. 5. Кросс-плоты: $\lg K_{in}$, K_{fr}/φ (*слева*) с линией регрессии, описываемой уравнением (1); $\lg K_{in}$, $K_{fr}/\lg \sigma_{EPS1}$ (*справа*) по данным [*Kushnir, Heap, Baud,* 2018]. Черные кружки – проницаемость неповреждённых образцов, белые кружки – трещиноватых

Fig. 5. Cross-plots: $\lg K_{in}$, K_{fr}/φ (*on the left*) with the regression line described by equation (1); $\lg K_{in}$, $K_{fr}/\lg \sigma_{EPS1}$ (*on the right*) according to [*Kushnir, Heap, Baud,* 2018]. Black circles are the permeability of intact samples, white circles are the permeability of fractured samples

Прогноз проницаемости на глубинах больше глубины скважины

Методика. Чтобы оценить зависимость точности прогноза проницаемости от соотношения прогнозной и скважинной глубин использовалась нейросетевая методика, основанная на применении искусственных нейросетей "с учителем" (по аналогии с методикой прогноза пористости из работы [*Спичак, Захарова,* 2015]), с последующим сравнением прогнозных и исходных данных. При этом прогноз проницаемости на больших глубинах моделировался её прогнозом на части глубины скважины, к данным из которой не обращались при обучении искусственных нейросетей (ИНС).

Для каждого из двух типов проницаемости (K_{in} и K_{fr}) была выполнена оценка точности прогноза проницаемости на глубину. С этой целью анализировались сглаженные исходные данные, заданные на глубинах осадочного чехла менее 1400 м (см. рис. 4). В первом варианте прогноз осуществлялся только по данным ближайшего к скважине профиля электропроводности. Соответственно, на этапе обучения ИНС значения логарифма проницаемости lgK в скважине сопоставлялись со значениями логарифма электропроводности lg σ_{EPS1} , определённого на тех же глубинах, а на этапе прогноза они

"экстраполировались" обученной таким образом ИНС на большие глубины по значениям $\lg \sigma_{EPS1}$ на этих глубинах. Во втором варианте ИНС обучалась на соответствии логарифма проницаемости $\lg K$ и логарифма электропроводности $\lg \sigma_{EPS1}$ и пористости φ , а прогноз проницаемости на глубину проводился по значениям электропроводности и пористости на этих глубинах. Наконец, в третьем варианте ИНС обучалась на соответствии логарифма проницаемости $\lg K$ и пористости φ , а прогноз проницаемости на глубину осуществлялся только по значениям пористости на этих глубинах.

Оценка точности прогноза. Оценка зависимости точности прогнозов от соотношения глубин прогноза и самой скважины (δ) выполнялась следующим образом. Части профилей проницаемости, электропроводности и пористости на глубинах до 1400 м были разделены на десять интервалов, и искусственные нейросети последовательно обучались на соответствии этих параметров из верхних частей (δ =1/10, 2/10, ..., 9/10) профиля. После каждого обучения соответствующие ИНС применялись для прогноза проницаемости в оставшихся (нижних) частях профиля, а результаты прогноза сравнивались с его фактическими значениями.

Для того чтобы оценить точность нейросетевого прогноза проницаемости *K*, вычислялась средняя относительная ошибка є по всей совокупности прогнозных значений:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{n} \frac{\left| \lg K_n^t - \lg K_n^{ANN} \right|}{\lg K_n^t} \times 100 \%, \qquad (2)$$

1.9

1.8

1.9

1.9

1.8

1.4

где n – номер точки, в которой осуществляется прогноз (n=1, ..., N); N – общее число таких точек; K_n^t и K_n^{ANN} – значения измеренной и прогнозной проницаемости в n-м пункте.

Относительные ошибки прогноза проницаемости неповреждённых и трещиноватых образцов для скважины *EPS*1 в зависимости от части исходных данных δ , использованных для обучения ИНС, представлены в таблице и на рис. 6. (Заметим, что в первом случае речь идёт о кривой K_{in} , а во втором – K_{fr} , показанных на рис. 4.) Как и следовало ожидать, в обоих случаях с увеличением параметра δ , т.е. с уменьшением соотношения между прогнозируемой глубиной и глубиной скважины, средняя относительная ошибка прогноза ε во всех трёх вариантах уменьшается. При этом во всех трёх вариантах прогноза в случае трещиноватых образцов она оказывается в 2–3 раза меньше, чем в случае неповреждённых.

олижаиших і	к скважине, ис	пользованных	сдля обучения	I = TOJI	ько σ, <i>2</i> – σ и φ	о, 5 – Только ф
δ	Проницаемость неповреждённых			Проницаемость трещиноватых		
	образцов (<i>K</i> _{in} , %)			образцов (<i>K</i> _f , %)		
	1	2	3	1	2	3
0.1	12.6	9.1	13.5	7.8	7.4	6.6
0.2	11.0	7.9	12.3	3.4	2.2	1.8
0.3	10.0	8.7	10.4	3.0	3.0	3.5
0.4	7.7	8.3	10.1	2.6	3.0	3.9
0.5	7.0	7.0	7.7	2.5	2.2	2.8
0.6	6.3	7.1	7.4	1.5	1.6	1.9
0.7	67	64	77	17	17	1.8

7.1

4.4

Относительные ошибки прогноза проницаемости на глубину в зависимости от части (δ) данных по проницаемости, профилей пористости (φ) и электропроводности (σ), ближайших к скважине, использованных для обучения ИНС: *1* – только σ, *2* – σ и φ, *3* – только φ

6.7

4.1

6.8

2.1

0.8

0.9



Рис. 6. Зависимость средних относительных ошибок прогноза проницаемости є от части δ профилей проницаемости, пористости и электропроводности, использованных для обучения ИНС: *слева* – неповреждённые образцы; *справа* – трещиноватые образцы; $1 - \lg \sigma_{EPS1}$; $2 - \lg \sigma_{EPS1}$ и φ ; $3 - \varphi$

Fig. 6. Dependence of the average relative errors of the permeability prediction ε on the portion δ of the permeability, porosity and electrical conductivity profiles used for artificial neural networks training: *on the left* – intact samples; *on the right* – fractured samples; $1 - \lg \sigma_{EPS1}$; $2 - \lg \sigma_{EPS1}$ and φ ; $3 - \varphi$

Этот, на первый взгляд, парадоксальный результат можно объяснить тем, что при искусственном создании трещиноватости в образцах породы происходило резкое нарушение индивидуальной геометрии пор. В следствие этого, с одной стороны, их проницаемость повысилась до максимально возможной величины (независимо от первоначальной), а, с другой стороны, на несколько порядков уменьшился диапазон её разброса. Эта так называемая "нормализация" проницаемости [Kushnir, Heap, Baud, 2018] произвела эффект её пространственного усреднения (сглаживания), что, в свою очередь, улучшило точность нейросетевого прогноза, как известно, чувствительного к степени гладкости обучающих данных. В результате, экстраполяция до глубин, соответствующих значениям δ =0.5, привела к относительной ошибке 7 % в случае неповреждённых образцов и всего 2.5 % – в случае трещиноватых.

Сравнение ошибок прогноза проницаемости K_{in} в вариантах 1-3 показывает, что, если при соотношении $\delta \ge 0.5$ ошибки прогноза во всех трёх вариантах близки, то при $\delta < 0.5$ прогноз только по данным пористости оказывается хуже двух других. Минимальные ошибки прогноза достигаются при одновременном использовании данных пористости и электропроводности.

Из полученных результатов можно сделать важные для практики выводы. Вопервых, точность прогноза проницаемости по данным пористости и электропроводности примерно одинакова. В этом смысле можно говорить об их возможной взаимозаменяемости при оценке (восстановлении) данных проницаемости внутри скважины. Вовторых, увеличение объёма обучающих данных за счёт одновременного применения данных пористости и электропроводности, заданных на одних и тех же глубинах, позволяет снизить ошибки прогноза при неблагоприятном соотношении глубин скважины и цели (при условии, что обе меньше глубины кристаллического фундамента). Втретьих, заметно более высокая точность прогноза по данным для трещиноватых образцов говорит о том, что после искусственного стимулирования скважин, в результате которого повышается их трещиноватость, точность электромагнитного прогноза проницаемости может также повышаться.

Прогноз проницаемости в кристаллическом фундаменте. Известно, что сейсморазведка хорошо выявляет зоны разломов в осадочном чехле и хуже в верхней части кристаллического фундамента. Поэтому такие разломы часто экстраполируют на глубины фундамента (см., например, [Sausse et al., 2010]). Между тем, для эффективной разведки геотермальных ресурсов требуется использование более точных методов оценки естественной проницаемости, особенно на глубинах, превышающих глубины пробуренных скважин. Поэтому на втором этапе было проведено моделирование электромагнитного прогноза усреднённой проницаемости на глубины кристаллического фундамента в Сульце (от 1400 до 2200 м) с помощью искусственной нейросети, обученной на данных трёх разных типов из осадочного чехла (см. выше раздел "Методика"). При этом во всех трёх перечисленных выше вариантах ИНС обучалась на сглаженных данных проницаемости в неповреждённых образцах по всей длине скважины (см. рис. 4, график усреднённых значений K_{in}). Кроме того, для сравнения дополнительно был выполнен прогноз проницаемости по формуле линейной регрессии исходных данных (1).

Результаты прогнозов проницаемости на глубины гранитного фундамента приведены на рис. 7. Их сравнение с исходной кривой проницаемости показало, что относительные ошибки прогнозов в вариантах *1–4* составляют 1.2, 1.8, 7.8 и 11.5 %, соответственно. Иначе говоря, худший результат (ошибка составляет 11.5 %) достигается при экстраполяции проницаемости по эмпирической формуле (1), полученной на основе корреляции исходных данных.

Рис. 7. Сопоставление графиков прогнозной проницаемости в гранитном основании, полученных с помощью ИНС, обученной на сглаженных данных проницаемости неповреждённых образцов из осадочного чехла: $\lg \sigma_{EPS1} (I)$; $\lg \sigma_{EPS1} и \varphi (2)$; $\varphi (3) и по$ формуле (1) линейной регрессии (4), с исходнойкривой проницаемости (5)

Fig. 7. Comparison of graphs of predicted permeability in the granite base obtained using artificial neural networks trained on smoothed data on the permeability of intact samples from the sedimentary covex: $\lg \sigma_{EPS1}(1)$; $\lg \sigma_{EPS1}$ and $\varphi(2)$; $\varphi(3)$ and according to the formula (1) of linear regression (4) with the original permeability curve (5)





Ошибка заметно уменьшается при увеличении в исходных данных доли данных электропроводности – от 7.8 % при использовании только данных пористости до 1.2 % при рассмотрении только данных электропроводности. Это можно объяснить тем, что на глубинах кристаллического фундамента (более 1400 м) граниты практически не имеют межзерновой пористости (в нашем случае она составляет в среднем 2 % (см. рис. 4)) и проницаемость обеспечена только трещинами. Поэтому прогноз проницаемости на соответствующих глубинах, осуществляемый ИНС, обученной на данных преимущественно межзерновой пористости пород осадочного чехла, приводит к значительным ошибкам. В то же время, электропроводность коррелирует с объёмом флюидов, заполняющих не только поры, но и трещины. Соответственно, её добавление в пул обучающих данных (и, что ещё более существенно, прогноз по ней) даёт возможность заметно снизить ошибку.

В целом, полученные результаты говорят о том, что электромагнитный прогноз проницаемости на глубинах под скважиной, который основан на использовании усреднённых данных проницаемости, измеренных на образцах из пробуренной части скважины, мог бы позволить осуществить достаточно точный прогноз тенденции её изменения на большой глубине. При необходимости его можно уточнять по данным электрокаротажа во время возможного продолжения бурения по технологии *Forecasting While Drilling – FWD [Spichak,* 2013, 2014; *Спичак,* 2017].

Прогноз проницаемости в пространстве между скважинами

Чтобы оценить перспективность электромагнитного прогноза проницаемости в пространстве между скважинами, было проведено нейросетевое моделирование прогноза в месте расположения скважины *GPK*1 (см. рис. 2), а также вдоль проходящего через неё и скважину *EPS*1 МТ профиля. С этой целью искусственная нейросеть была обучена на соответствии исходных (не усреднённых, как в предыдущем разделе) данных проницаемости неповреждённых образцов lgK_{in} и электропроводности $lg\sigma_{EPS1}$ по всей длине скважины *EPS*1 (см. рис. 4). Затем с помощью ИНС был выполнен прогноз проницаемости сначала в пункте расположения скважины *GPK*1, а потом вдоль МТ профиля, проходящего через неё и скважину *EPS*1.

Прогноз проницаемости в пункте расположения скважины GPK1. В этом случае прогноз проницаемости осуществлялся обученной искусственной нейросетью по данным lgσ_{GPK1} (см. рис. 4).

График прогнозной проницаемости в пункте локализации скважины *GPK*1 представлен на рис. 8. К сожалению, его нельзя сравнить с таким же графиком проницаемости для этой скважины из-за отсутствия измерений. Однако можно косвенно оценить точность нашего прогноза, сравнив график проницаемости с расположением трещиноватых зон *FZ*1–*FZ*6 [*Dezayes, Genter, Valley,* 2010], подтверждённых результатами вертикального сейсмического профилирования (*VSP*) [*Place, Cox, Naville,* 2007; *Sausse et al.,* 2010]. Как видно на графике, практически все трещиноватые зоны расположены на глубинах, где наблюдаются локальные максимумы проницаемости. Исключение составляет зона *FZ*6, где проницаемость по разным причинам может быть низкой. Отсюда можно сделать вывод о том, что локальные максимумы проницаемости оказываются хорошими индикаторами проницаемых трещиноватых зон. Косвенным подтверждением точности прогноза является повышенная проницаемость ($K>10^{-17}$ м²) на глубинах 1600–1850 м, где была обнаружена сильная утечка бурового раствора, истечение газа и пластовых вод [*Vuataz et al.,* 1990]. Сравнивая выделенный участок графика прогнозной проницаемости с графиком скорости потока флюидов на врезке, можно видеть



Рис. 8. Прогноз проницаемости в пункте расположения скважины *GPK*1. Штриховкой показаны области локальных максимумов проницаемости; *FZ*1–*FZ*6 – трещиноватые зоны, определённые по данным [*Dezayes, Genter, Valley,* 2010] и подтверждённые вертикальным сейсмическим профилированием (*VSP*) по данным [*Sausse et al.,* 2010]. Жирной линией выделен участок графика, соответствующий измерениям скорости потока флюидов [л/с] при гидравлических тестах скважины *GPK*1 в диапазоне глубин 2850–3100 м (по [*Sausse, Fourar, Genter,* 2006] с изменениями), представленный на врезке (черный график – исходные данные, серый – сглаженные)

Fig. 8. Permeability forecast at the location of the well *GPK*1. Hatching shows areas of local permeability maxima; FZ1-FZ6 – are fractured zones defined according to [*Dezayes, Genter, Valley,* 2010] and confirmed by vertical seismic profiling (*VSP*) according to [*Sausse et al.,* 2010]. The thick line highlights the section of the graph corresponding to the measurements of the fluid flow rate [l/s] during hydraulic tests of the *GPK*1 well in the depth range of 2850–3100 m (according to [*Sausse, Fourar, Genter,* 2006] with changes), shown in the inset (black graph – original data, gray – smoothed)

одинаковое трёхкратное снижение указанных величин на участке глубин 2850–3100 м во время гидравлического тестирования скважины *GPK*1 [*Sausse, Fourar, Genter,* 2006], что служит ещё одним косвенным подтверждением точности прогноза.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. 2022. Том 23. № 2

С другой стороны, наличие трещиноватых зон и разломов, обнаруженных тем или иным методом ранее, и тем более экстраполированных из осадочного чехла на глубины фундамента (см., например, [Sausse et al., 2010]), ещё не гарантирует проницаемость пород, достаточную для движения геотермальных флюидов.

В целом, на глубинах более 4000 м проницаемость изменяется слабо и составляет примерно 10^{-18} м², что соответствует её средним значениям (4·10⁻¹⁹ м²), полученным в работе [*Sardini, Ledesert, Touchard,* 1997] при измерениях на образцах гранита в Сульце.

Разрез проницаемости вдоль профиля МТЗ. Для построения разреза проницаемости вдоль МТ профиля использовалась та же ИНС, обученная на соответствии данных проницаемости из скважины *EPS*1 и соседнего профиля электропроводности (см. выше). Но при этом прогноз делался по результатам 2D инверсии МТ данных вдоль профиля, проходящего через скважины *GPK*1 и *EPS*1 (см. рис. 3). На рис. 9 показан построенный таким образом разрез прогнозной проницаемости, на котором видно, что в целом она изменяется в разрезе в широком диапазоне значений от 10^{-20} до 10^{-14} м². При этом наиболее проницаемые зоны (K>10⁻¹⁷ м²) расположены в осадочном чехле в окрестности скважин *GPK*1 и *EPS*1 вблизи проходящих там разломов [*Dezayes, Genter, Valley,* 2010].



Рис. 9. Разрез прогнозной проницаемости, построенный с помощью ИНС, обученной на данных профиля электропроводности и проницаемости неповреждённых образцов из скважины *EPS*1 (расположение профилей см. на рис. 4). Условные обозначения см. на рис. 3

Fig. 9. Predictive permeability section constructed using artificial neural networks trained on the data of the electrical conductivity and permeability profile of intact samples from the EPS1 well (see the location of the profiles in Fig. 4). See notations in Fig. 3

Обращает на себя внимание плохо проницаемый пласт ($K < 10^{-18} \text{ м}^2$) мощностью примерно 500 м, верхняя кромка которого находится в центральной части разреза на глубине примерно 800 м и опускается до 2000 м на северо-западной и юго-восточной периферии, доходя до расположенных там окаймляющих разломов. Пространственно

этот слой соответствует переходной зоне между обнаруженными при анализе геотерм в скважинах Сульц-су-Форе [Pribnow, Engelking, Schellschmidt. 1997; *Pribnow*, Schellschmidt, 2000; Genter et al., 2010; Vidal, Genter, Schmittbuhl, 2015] двумя разными механизмами переноса тепла – кондуктивным (выше её) и конвекцией (ниже). С понижением температуры в этой зоне могут осаждаться такие гидротермальные минералы, как вторичный кварцит, кальцит и сульфид, а также богатые глиной минералы [Genter et al., 1997]. В результате, на этих глубинах может образовываться покрышка, "запирающая" возможную крупномасштабную циркуляцию флюидов в более проницаемых областях в основании осадочного чехла и верхней части гранитного фундамента. Этот вывод подтверждает предположение, сделанное в работе [Vidal, Genter, Schmittbuhl, 2015] на основании сравнительного анализа стратиграфии и данных геофизического исследования отдельных скважин, пробуренных в Сульц-су-Форе.

Таким образом, электромагнитный прогноз проницаемости в пространстве между скважинами позволяет судить о её общем распределении в разрезе и делать выводы о наиболее перспективных участках и глубинах для разведки геотермальных ресурсов. Отметим в этой связи, что глубина прогнозных моделей проницаемости, которые строятся по данным электромагнитного зондирования, ограничена только глубинностью используемого с этой целью метода.

Выводы

Проведённые модельные исследования говорят о том, что удельное электрическое сопротивление (электропроводность) можно считать хорошим прокси-параметром для оценки проницаемости пород как в самих скважинах (для восполнения пропущенных данных), так и в пространстве между ними, где отсутствуют данные геофизического исследования скважин. Точность такого прогноза на глубину зависит от соотношения глубины пробуренной скважины, в которой есть соответствующие измерения проницаемости, и целевой глубины. В частности, при наличии вертикального профиля значений удельного сопротивления рядом со скважиной, в которой есть измерения проницаемости, можно делать прогноз проницаемости на удвоенную глубину скважины с относительной ошибкой 2.5-7 % в зависимости от степени трещиноватости пород. Это коррелирует с высокой точностью электромагнитного прогноза пористости – средняя относительная ошибка её прогноза на удвоенные глубины составляет примерно 10 % [Спичак, Захарова, 2015].

Результаты исследования свидетельствуют о принципиальной возможности выявления проницаемых зон в пространстве между скважинами по итогам измерения проницаемости на образцах пород в самих скважинах и инверсии данных электромагнитного зондирования в их окрестности. Иначе говоря, предложенный метод может служить связующим звеном между геофизическими методами исследования скважин и геотермальных резервуаров.

Согласно полученным результатам, точность электромагнитного прогноза проницаемости в искусственно трещиноватых породах существенно улучшается. Это даёт надежду на то, что его применение для оценки степени изменения проницаемости до и после стимулирования геотермальных скважин (что особенно актуально в контексте работ по петротермальным ресурсам) будет способствовать повышению надёжности выводов об их апостериорной проницаемости.

По данным МТЗ и измерениям проницаемости в скважине построен разрез проницаемости для геотермальной зоны Сульц-су-Форе. Его анализ позволил сделать выводы об общем характере поведения проницаемости до глубины 5 км. В частности,

31

обнаружена непроницаемая покрышка, предположительно образованная остывающими вторичными гидротермальными минералами, которая разделяет области кондуктивной и конвективной передачи тепла.

Наконец, полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой точности прогноза тренда проницаемости на глубинах, превышающих пробуренную (например, относительная ошибка при прогнозе на удвоенную глубину составляет около 1 %). Это делает такой метод востребованным в рамках предложенной ранее стратегии прогноза фильтрационно-ёмкостных свойств резервуара во время бурения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность доктору А. Жантеру (ES-Geothermie, Франция) и доктору К. Дезайе (BRGM, Франция), предоставившим данные пористости, а также профессору Е. Шилл (Karlsruhe Institute of Technology, Германия) и инженеру Г. Гейерману (Institute for Geothermic Resources Management, Германия), предоставившим результаты инверсии данных МТ зондирований. Авторы признательны анонимным рецензентам, сделавшим ряд критических замечаний и предложений, позволивших улучшить статью.

Финансирование

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- *Кобранова В.Н.* Петрофизика. Учебник для вузов. Издание 2-е, дополненное и переработанное. М.: Недра, 1986. 392 с.
- Спичак В.В. Применение электромагнитных методов для поиска, разведки и мониторинга залежей углеводородов // Геофизика. 2017. № 6. С.33–44.
- Спичак В.В. Электромагнитная томография земных недр. М.: Научный мир, 2019. 374 с.
- Спичак В.В., Захарова О.К. Электромагнитный геотермометр. М.: Научный мир, 2013. 172 с.
- Спичак В.В., Захарова О.К. Прогноз пористости на глубину ниже забоя скважин по данным электромагнитных зондирований и электрокаротажа // Геофизика. 2015. № 6. С.43–49.
- *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. 2-е изд., испр. Пер. с англ. М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2006. 1104 с.
- Шмонов В.М., Витовтова В.М. Проницаемость пород и плотность флюидов в высокотемпературных геохимических процессах (экспериментальные исследования). М.: Научный мир, 2017. 296 с.
- Aminian K., Ameri S. Application of artificial neural networks for reservoir characterization with limited data // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2005. V. 49, N 3–4. P.212–222. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.05.007
- Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York: Elsevier, 1972. 764 p.
- *Beard D.C., Weyl P.K.* Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand // AAPG Bull. 1973. V. 57. P.349–369.
- *Bhatt A., Helle H.B.* Committee neural networks for porosity and permeability prediction from well logs // Geophys. Prospect. 2002. V. 50. P.645–660.

- Brace W.F., Walsh J.B., Frangos W.T. Permeability of Granite under High Pressure // J. Geophys. Res. 1968. V. 72, N 6. P.2225–2236.
- *Da Rocha H.O., Da Costa J.L.S., Carrasquilla A.A.G.* Permeability estimation and analysis of fracture networks using resistivity logs in an offshore Aptian carbonate reservoir pre-salt, in the South-eastern Santos Basin // J. Appl. Geophys. 2021. N 184. P. 104241. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104241
- *Dezayes C., Genter A., Hooijkaas G.* Deep-seated geology and fracture system of the EGS Soultz reservoir (France) based on recent 5km depth boreholes // Proc. World Geothermal Congress. Antalya. Turkey. 2005. P.24–29.
- Dezayes C., Genter A., Valley B. Structure of the low permeable naturally fractured geothermal reservoir at Soultz // Comptes Rendus Géoscience. 2010. V. 343, N 7–8. P.517–530.
- *Díaz-Curiel J., Biosca B., Miguel M.J.* Geophysical Estimation of Permeability in Sedimentary Media with Porosities from 0 to 50 % // Oil & Gas Science and Technology Rev. IFP Energies nouvelles. 2016. V. 71. P.27–44.
- *Evans K.F., Kohl T., Hopkirk J., Rybach L.* Studies of the Nature of Non-linear Impedance to Flow within the Fractured Granitic Reservoir at the European Hot Dry Rock Project site at Soultz-sous-Forêts, France // ETH Zurich report-Polydynamics Engineering, Institut f^{*}ur Geophysik. Zurich, Switzerland. 1996. P.144.
- *Geiermann J.* 2-D magnetotelluric sounding and modeling at the geothermal site Soultz-sous-Forêts // Dipl. Phys., J. Gutenberg Universitat. Mainz, Germany. 2009. 98 p.
- *Geiermann J., Schill E.* 2-D Magnetotellurics at the geothermal site at Soultz-sous-Forêts: Resistivity distribution to about 3000 m depth // Comptes Rendus Géoscience. 2010. V. 342. P.587–599.
- Genter A., Castaing C., Dezayes C., Tenzer H., Traineau H., Villemin T. Comparative analysis of direct (core) and indirect (borehole imaging tools) collection of fracture data in the Hot Dry Rock Soultz reservoir (France) // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 1997. V. 102, N B7. P.15,419–15,431.
- *Genter A., Evans K., Cuenot N., Fritsch D., Sanjuan B.* Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS) // Comptes Rendus Géoscience. 2010. V. 342. P.502–516.
- Geraud Y., Rosener M., Surma F., Place J., Le Garzic E., Diraison M. Physical properties of fault zones within a granite body: Example of the Soultz-sous-Forêts geothermal site // Comptes Rendus Géoscience. 2010. V. 342. P.566–574.
- Haene R., Legrand R., Balling N., Saxov S., Bram K., Gable R., Meunier J., Fanelli M., Rossi A., Salmone M., Taff L., Prins S., Burley A.J., Edmunds W.M., Oxburgh E.R., Richardson S.W., Wheildon J. Atlas of subsurface temperatures in the European Comminity. Hannover: Th. Schafer Druckerei GmH, 1979. 655 p.
- Heap M.J., Kennedy B.M., Farquharson J.I., Ashworth J., Mayer K., Letham-Brake M., Reuschlre T., Gilg A.H., Scheu B., Lavallree Y., Siratovich P., Cole J., Jolly A.D., Baud P., Dingwell D.B. A multidisciplinary approach to quantify the permeability of the Whakaari/White Island volcanic hydrothermal system (Taupo Volcanic Zone, New Zealand) // J. Volc. Geotherm. Res. 2017. V. 332. P.88–108. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.12.004
- *Helle H.B., Bhatt A., Ursin B.* Porosity and permeability prediction from wireline logs using artificial neural networks: a North Sea case study // Geophys. Prospect. 2001. V. 49. P.431–444.
- Huang Z., Shimeld J., Williamson M., Katsube J. Permeability prediction with artificial neural network modeling in the Venture gas field, offshore eastern Canada // Geophysics. 1996. V. 61, N 2. P.422–436. https://doi.org/10.1190/1.1443970
- *Katz A.J., Thompson A.H.* Quantitative prediction of permeability in porous rock // Phys. Rev. B. 1986. V. 34, N 11. P.8179–8181. DOI: 10.1103/physrevb.34.8179
- Kushnir A.R.L., Heap M.J., Baud P. Assessing the role of fractures on the permeability of the Permo-Triassic sandstones at the Soultz-sous-Forêts (France) geothermal site // Geothermics. 2018. V. 74. P.181–189.
- Latt K.M.M., Giao P.H. Prediction of permeability of cement-admixed soft clay using resistivity and time-domain IP measurements // J. Appl. Geophys. 2017. V. 137. P.92–103. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.12.015

- Ledesert B., Hebert R., Genter A., Bartier D., Clauer N., Grall C. Fractures, hydrothermal alterations and permeability in the Soultz enhanced geothermal system // Comptes Rendus Géoscience. 2010. V. 342, N 7–8. P.607–615.
- *Lim J.* Reservoir permeability determination using artificial neural network // J. Korean Soc. Geosyst. Eng. 2003. V. 40. P.232–238.
- *Ma S., Morrow N.R.* Relationships Between Porosity and Permeability for Porous Rocks // Proc. SCA Conference. 1996. Paper Number 9610. 12 p.
- Manning C.E., Ingebritsen S.E. Permeability of the continental crust: implications of geothermal data and metamorphic systems // Rev. Geophys. 1999. V. 37, N 1. P.127–150. https://doi.org/10.1029/ 1998RG900002
- *Place J., Cox M., Naville C.* Oriented 3C VSP (three component Vertical Seismic Profiling) applied to the delineation of highly dipping faults in a deep granitic basement // Proceedings of the EHDRA scientific conference. 2007. P.28–29.
- Pribnow D., Engelking U., Schellschmidt R. Temperature prediction for the HDR Project at Soutzsous-Forêts // GGA tech. rpt. № 115869. 1997. 10 p.
- *Pribnow D., Schellschmidt R.* Thermal tracking of upper crustal fluid flow in the Rhine graben // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27, N 13. P.1957–1960.
- *Rosener M.* Etude petrophysique et modelisation des transferts thermiques entre roche et fluide dans le contexte geothermique de Soultz-sous-Forêts: Ph. D. dissertation, These Universite Louis Pasteur Strasbourg, France. 2007. 107 p.
- Sardini P., Ledesert B., Touchard G. Quantification of microscopic porous networks by image analysis and measurements of permeability in the Soultz-sous-Forets granite (Alsace, France) // Fluid Flow and Transport in Rocks. Springer: Dordrecht, 1997. P.171–189. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1533-6_10
- Sausse J., Fourar M., Genter A. Permeability and alteration within the Soultz granite inferred from geophysical and flow log analysis. Geothermics. 2006. V. 35, N 5–6. P.544–560.
- Sausse J., Dezayes, C., Dorbath L., Genter A., Place J. 3D model of fracture zones at Soultz-sous-Forêts based on geological data, image logs, induced microseismicity and vertical seismic profiles // Comptes Rendus Geoscience. 2010. V. 342. P.531–545.
- Schill E., Geiermann J., Kümmritz J. 2-D magnetotellurics and gravity at the geothermal site at Soultzsous-Forêts // Proc. World Geothermal Congress, Bali, Indonesia. 2010. P.25–29.
- *Spichak V.V.* Electromagnetic sounding for geothermal exploration: new horizons // Proc. Workshop to Promote a Collaborative Initiative to Develop Higher Enthalpy Geothermal Systems in the USA. San-Bernardino, California. 2013.
- *Spichak V.V.* Reduce geothermal exploration drilling costs: pourquoi pas?! // Proc. D-GEO-D Conference. Paris, France. 2014.
- Spichak V.V., Geiermann J., Zakharova O., Calcagno P., Genter A., Schill E. Estimating deep temperatures in the Soultz-sous-Forêts geothermal area (France) from magnetotelluric data // Near Surface Geophysics. 2015. V. 13, N 4. P.397–408.
- Surma F., Geraud Y. Porosity and Thermal Conductivity of the Soultz-sous-Forêts Granite // Pure Appl. Geophys. 2003. V. 160. P.1125–1136.
- *Urang J.G., Ebong E.D., Akpan A.E., Akaerue E.I.* A new approach for porosity and permeability prediction from well logs using artificial neural network and curve fitting techniques: A case study of Niger Delta, Nigeria // J. Appl. Geophys. 2020. V. 183. P.1–14.
- Verma K.A., Cheadle A.B., Routray A., Mohanty K.W., Mansinha L. Porosity and Permeability Estimation using Neural Network Approach from Well Log // Geoconvention Vision. Canada. 2012. 9 p.
- Vernoux J.F., Genter A., Razin P., Vinchon C. Geological and petrophysical parameters of a deep fractured sandstone formation as applied to geothermal exploitation: EPS1 borehole, Soultz-sous-Forêts, France // BRGM Open file report. 1995. V. 38622. 33 p.
- *Vidal J., Genter A.* Overview of naturally permeable fractured reservoirs in the central and southern Upper Rhine Graben: Insights from geothermal wells // Geothermics. 2018. V. 74. P.57–73.
- *Vidal J., Genter A., Chopin F.* Permeable fracture zones in the hard rocks of the geothermal reservoir at Rittershoffen, France // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2017. V. 122, N 7. P.4864–4887.

- *Vidal J., Genter A., Duringer P., Schmittbuhl J.* Natural Permeability in Fractured Triassic Sediments of the Upper Rhine Graben from Deep Geothermal Boreholes // Proc. World Geothermal Congress, Melbourne, Australia. 2015. P.1–13.
- *Vidal J., Genter A., Schmittbuhl J.* How do permeable fractures in the Triassic sediments of Northern Alsace characterize the top of hydrothermal convective cells? Evidence from Soultz geothermal boreholes (France) // Geothermal Energy. 2015. V. 3, N 8. 28 p.

Vuataz F.D., Brach M., Criaud A., Fouillac C. Geochemical monitoring of drilling fluids: a powerful tool to forecast and detect formation waters // SPE Formation Evaluation. 1990. P.177–184.

Wang B., Wang X., Chen Z. A hybrid framework for reservoir characterization using fuzzy ranking and an artificial neural network // Comput. Geosci. 2013. V. 57. P.1–10.

Сведения об авторах

СПИЧАК Вячеслав Валентинович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта. 108840, г. Москва, Троицк, ЦГЭМИ, а/я 30. Тел.: +7(495) 840-70-62. Е-mail: v.spichak@mail.ru

ЗАХАРОВА Ольга Константиновна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта. 108840, г. Москва, Троицк, ЦГЭМИ, а/я 30. Тел.: +7(495) 840-70-62. Е-mail: okzakharova@mail.ru

ELECTROMAGNETIC PERMEABILITY FORECAST BEYOND BOREHOLES

V.V. Spichak, O.K. Zakharova

Geoelectromagnetic Research Centre of Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia Corresponding author: V.V. Spichak (e-mail: v.spichak@mail.ru)

Abstract. The results of the conducted simulation studies indicate that electrical conductivity of rocks could be considered as a good proxy parameter for permeability forecasting both in the boreholes and in the space between them. It is shown that the accuracy of the neural network permeability forecasting from results of the electromagnetic sounding significantly depends on the ratio of the borehole and target depths. In particular, the relative accuracy of the permeability forecast in depths two times exceeding the well depth could range between 2.5 and 7 % depending on rock fracturing. At the same time, the relative error of the averaged permeability forecast could be around 1-2 % for the same depth ratio. A two-dimensional permeability model of the Soultz-sous-Forêts geothermal site (France) is built from the inversion of magnetotelluric sounding results up to the depth of 5 km. Its analysis enabled to detect permeable fracture zones perspective for exploration drilling

Keywords: permeability, prediction, electrical conductivity, fracturing, borehole, artificial neural network.

Acknowledgements

The authors are grateful to Dr. A. Genter (ES-Geothermie, France) and Dr. C. Dezayes (BRGM, France) for providing the porosity data, as well as to Prof. E. Schill (Karlsruhe Institute of Technology, Germany) and engineer J. Geiermann (Institute for Geothermic Resources Management, Germany) for providing results of MT sounding inversion data. The authors are grateful to the anonymous reviewers for critical remarks and suggestions, which helped to improve the text.

Funding

The work was funded by Russian Science Foundation (project no. 20-17-00155).

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Aminian K., Ameri S., Application of artificial neural networks for reservoir characterization with limited data, *J. Pet. Sci. Eng.*, 2005, vol. 49, no. 3-4, pp. 212-222.
- Bear J., Dynamics of Fluids in Porous Media, New York: Elsevier, 1972, 764 p.
- Beard D.C., Weyl P.K., Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand, *AAPG Bull.*, 1973, vol. 57, pp. 349-369.
- Bhatt A., Helle H.B., Committee neural networks for porosity and permeability prediction from well logs, *Geophys. Prospect.*, 2002, vol. 50, pp. 645-660.
- Brace W.F., Walsh J.B., Frangos W.T., Permeability of Granite under High Pressure, J. Geophys. Res., 1968, vol. 72, no. 6, pp. 2225-2236.
- Da Rocha H.O., Da Costa J.L.S., Carrasquilla A.A.G., Permeability estimation and analysis of fracture networks using resistivity logs in an offshore Aptian carbonate reservoir pre-salt, in the Southeastern Santos Basin, *J. Appl. Geophys.*, 2021, vol. 184, pp. 104241. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104241
- Dezayes C., Genter A., Hooijkaas G., Deep-seated geology and fracture system of the EGS Soultz reservoir (France) based on recent 5km depth boreholes, *Proc. World Geothermal Congress, Antalya, Turkey*, 2005, pp. 24-29.
- Dezayes C., Genter A., Valley B., Structure of the low permeable naturally fractured geothermal reservoir at Soultz, *Comptes Rendus Géoscience*, 2010, vol. 343, no. 7-8, pp. 517-530.
- Díaz-Curiel J., Biosca B., Miguel M.J., Geophysical Estimation of Permeability in Sedimentary Media with Porosities from 0 to 50 %, Oil & Gas Science and Technology Rev. IFP Energies Nouvelles, 2016, vol. 71, pp. 27-44.
- Evans K.F., Kohl T., Hopkirk J., Rybach L., Studies of the Nature of Non-linear Impedance to Flow within the Fractured Granitic Reservoir at the European Hot Dry Rock Project site at Soultz-sous-Forets, France, *ETH Zurich report-Polydynamics Engineering*, Institut fur Geophysik. Zurich, Switzerland, 1996, p. 144.
- Geiermann J., 2-D magnetotelluric sounding and modeling at the geothermal site Soultz-sous-Forêts, *Dipl. Phys.*, J. Gutenberg Universitat, Mainz, Germany, 2009, 98 p.
- Geiermann J., Schill E., 2-D Magnetotellurics at the geothermal site at Soultz-sous-Forêts: Resistivity distribution to about 3000 m depth, *Comptes Rendus Géoscience*, 2010, vol. 342, pp. 587-599.
- Genter A., Castaing C., Dezayes C., Tenzer H., Traineau H., Villemin T., Comparative analysis of direct (core) and indirect (borehole imaging tools) collection of fracture data in the Hot Dry Rock Soultz reservoir (France), J. Geophys. Res.: Solid Earth, 1997, vol. 102, no. B7, pp. 15,419-15,431.
- Genter A., Evans K., Cuenot N., Fritsch D., Sanjuan B., Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS), *Comptes Rendus Géoscience*, 2010, vol. 342, pp. 502-516.
- Geraud Y., Rosener M., Surma F., Place J., Le Garzic E., Diraison M., Physical properties of fault zones within a granite body: Example of the Soultz-sous-Forêts geothermal site, *Comptes Rendus Géoscience*, 2010, vol. 342, pp. 566-574.
- Haenel R., Legrand R., Balling N., Saxov S., Bram K., Gable R., Meunier J., Fanelli M., Rossi A., Salmone M., Taff L., Prins S., Burley A.J., Edmunds W.M., Oxburgh E.R., Richardson S.W., Wheildon J., *Atlas of subsurface temperatures in the European Comminity*, Hannover: Th. Schafer Druckerei GmH, 1979, 655 p.
- Heap M.J., Kennedy B.M., Farquharson J.I., Ashworth J., Mayer K., Letham-Brake M., Reuschlre T., Gilg A.H., Scheu B., Lavallree Y., Siratovich P., Cole J., Jolly A.D., Baud P., Dingwell D.B., A multidisciplinary approach to quantify the permeability of the Whakaari/White Island volcanic hydrothermal system (Taupo Volcanic Zone, New Zealand), J. Volc. Geotherm. Res., 2017, vol. 332, pp. 88108. DOI: 10.1016/ j.jvolgeores.2016.12.004
- Helle H.B., Bhatt A., Ursin B., Porosity and permeability prediction from wireline logs using artificial neural networks: a North Sea case study, *Geophys. Prospect.*, 2001, vol. 49, pp. 431-444.

- 37
- Huang Z., Shimeld J., Williamson M., Katsube J., Permeability prediction with artificial neural network modeling in the Venture gas field, offshore eastern Canada, *Geophysics*, 1996, vol. 61, no. 2, pp. 422-436.
- Katz A.J., Thompson A.H., Quantitative prediction of permeability in porous rock, *Phys. Rev. B.*, 1986, vol. 34, no. 11, pp. 8179-8181. DOI: 10.1103/physrevb.34.8179
- Khaikin C., *Neironnye seti: polnyi kurs. 2-e izd., ispr.* (Neural networks: full course. 2nd ed., rev.), Moscow: OOO "I.D. Vil'yams", 2006, 1104 p. [In Russian].
- Kobranova V.N., *Petrofizika. Uchebnik dlya vuzov. Izdanie 2-e, dopolnennoe i pererabotannoe* (Petrophysics. Textbook for universities. 2-nd edition supplemented and revised), Moscow: Nedra, 1986, 392 p. [In Russian].
- Kushnir A.R.L., Heap M.J., Baud P., Assessing the role of fractures on the permeability of the Permo-Triassic sandstones at the Soultz-sous-Forêts (France) geothermal site, *Geothermics*, 2018, vol. 74, pp. 181-189.
- Latt K.M.M., Giao P.H., Prediction of permeability of cement-admixed soft clay using resistivity and timedomain IP measurements, J. Appl. Geophys., 2017, vol. 137, pp. 92-103. DOI: 10.1016/j.jappgeo. 2016.12.015
- Ledesert B., Hebert R., Genter A., Bartier D., Clauer N., Grall C., Fractures, hydrothermal alterations and permeability in the Soultz enhanced geothermal system, *Comptes Rendus Géoscience*, 2010, vol. 342, no. 7-8, pp. 607-615.
- Lim J., Reservoir permeability determination using artificial neural network, *J. Korean Soc. Geosyst. Eng.*, 2003, vol. 40, pp. 232-238.
- Ma S., Morrow N.R., Relationships Between Porosity and Permeability for Porous Rocks, *Proc. SCA Conference*, 1996, Paper Number 9610, 12 p.
- Manning C.E., Ingebritsen S.E., Permeability of the continental crust: implications of geothermal data and metamorphic systems, *Rev. Geophys.*, 1999, vol. 37, no. 1, pp. 127-150.
- Place J., Cox M., Naville C., Oriented 3C VSP (three component Vertical Seismic Profiling) applied to the delineation of highly dipping faults in a deep granitic basement, *Proceedings of the EHDRA scientific conference*, 2007, pp. 28-29.
- Pribnow D., Engelking U., Schellschmidt R., Temperature prediction for the HDR Project at Soutz-sous-Forêts, GGA tech. rpt. N 115869, 1997, 10 p.
- Pribnow D., Schellschmidt R., Thermal tracking of upper crustal fluid flow in the Rhine graben, *Geophys. Res. Lett.*, 2000, vol. 27, no. 13, pp. 1957-1960.
- Rosener M., Etude petrophysique et modelisation des transferts thermiques entre roche et fluide dans le contexte geothermique de Soultz-sous-Forêts, *Ph. D. dissertation*, These Universite Louis Pasteur Strasbourg, France, 2007. 107 p.
- Sardini P., Ledesert B., Touchard G., Quantification of microscopic porous networks by image analysis and measurements of permeability in the Soultz-sous-Forets granite (Alsace, France), in *Fluid Flow and Transport in Rocks*, Springer: Dordrecht, 1997, pp. 171-189.
- Sausse J., Dezayes, C., Dorbath L., Genter A., Place J., 3D model of fracture zones at Soultz-sous-Forêts based on geological data, image logs, induced microseismicity and vertical seismic profiles, *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, vol. 342, pp. 531-545.
- Sausse J., Fourar M., Genter A., Permeability and alteration within the Soultz granite inferred from geophysical and flow log analysis, *Geothermics*, 2006, vol. 35, no. 5-6, pp. 544-560.
- Schill E., Geiermann J., Kümmritz J., 2-D magnetotellurics and gravity at the geothermal site at Soultz-sous-Forêts, *Proc. World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*, 2010, pp. 25-29.
- Shmonov V.M., Vitovtova V.N., *Pronitsaemost' porod i plotnost' flyuidov v vysokotemperaturnykh geokhimicheskikh protsessakh (eksperimental'nye issledovaniya)* (Rock Permeability and Fluid Density in High-Temperature Geochemical Processes (Experimental Studies)), Moscow: Nauchnii mir, 2017, 296 p. [In Russian].
- Spichak V.V., Electromagnetic sounding for geothermal exploration: new horizons, *Proc. Workshop to Promote* a Collaborative Initiative to Develop Higher Enthalpy Geothermal Systems in the USA, San-Bernardino, California, 2013.
- Spichak V.V., Reduce geothermal exploration drilling costs: pourquoi pas?! Proc. D-GEO-D Conference. Paris, France, 2014.
- Spichak V.V., Application of electromagnetic methods for searching, prospecting and monitoring of the hydrocarbon deposits, *Geofizika* (Geeophysics), 2017, no. 6, pp. 33-44. [In Russian].
- Spichak V.V., *Elektromagnitnaya tomografiya zemnykh nedr* (Electromagnetic tomography of the Earth's interior), Moscow: Nauchnii mir, 2019, 374 p. [In Russian].
- Spichak V.V., Geiermann J., Zakharova O., Calcagno P., Genter A., Schill E., Estimating deep temperatures in the Soultz-sous-Forêts geothermal area (France) from magnetotelluric data, *Near Surface Geophysics*, 2015, vol. 13, no. 4, pp. 397-408.

- Spichak V.V., Zakharova O.K., *Elektromagnitnii geotermometr* (Electromagnetic geothermometer), Moscow, Nauchnii mir, 2013, 172 p. [In Russian].
- Spichak V.V., Zakharova O.K., Porosity forecast at depths below well bootomholes from the electrormagnetic sounding data, *Geofizika* (Geeophysics), 2015, no. 6, pp. 43-49. [In Russian].
- Surma F., Geraud Y., Porosity and Thermal Conductivity of the Soultz-sous-Forêts Granite, *Pure Appl. Geo-phys.*, 2003, vol. 160, pp. 1125-1136.
- Urang J.G., Ebong E.D., Akpan A.E., Akaerue E.I., A new approach for porosity and permeability prediction from well logs using artificial neural network and curve fitting techniques: A case study of Niger Delta, Nigeria, J. Appl. Geophys., 2020, vol. 183, pp. 1-14.
- Verma K.A., Cheadle A.B., Routray A., Mohanty K.W., Mansinha L., Porosity and Permeability Estimation using Neural Network Approach from Well Log, *Geoconvention Vision*, Canada, 2012, 9 p.
- Vernoux J.F., Genter A., Razin P., Vinchon C., Geological and petrophysical parameters of a deep fractured sandstone formation as applied to geothermal exploitation: EPS1 borehole, Soultz-sous-Forêts, France, BRGM Open file report, 1995, vol. 38622, 33 p.
- Vidal J., Genter A., Overview of naturally permeable fractured reservoirs in the central and southern Upper Rhine Graben: Insights from geothermal wells, *Geothermics*, 2018, vol. 74, pp. 57-73.
- Vidal J., Genter A., Chopin F., Permeable fracture zones in the hard rocks of the geothermal reservoir at Rittershoffen, France, J. Geophys. Res.: Solid Earth, 2017, vol. 122, no. 7, pp. 4864-4887.
- Vidal J., Genter A., Duringer P., Schmittbuhl J., Natural Permeability in Fractured Triassic Sediments of the Upper Rhine Graben from Deep Geothermal Boreholes, Proc. World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 2015, pp. 1-13.
- Vidal J., Genter A., Schmittbuhl J., How do permeable fractures in the Triassic sediments of Northern Alsace characterize the top of hydrothermal convective cells? Evidence from Soultz geothermal boreholes (France), *Geothermal Energy*, 2015, vol. 3, no. 8, 28 p. DOI: 10.1186/s40517-015-0026-4
- Vuataz F.D., Brach M., Criaud A., Fouillac C., Geochemical monitoring of drilling fluids: a powerful tool to forecast and detect formation waters, SPE Formation Evaluation, 1990, pp. 177-184.
- Wang B., Wang X., Chen Z., A hybrid framework for reservoir characterization using fuzzy ranking and an artificial neural network, *Comput. Geosci.*, 2013, vol. 57, pp. 1-10.

About the authors

SPICHAK Viacheslav Valentinovich – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Geoelectromagnetic Research Centre of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. GEMRC, POB 30, Moscow, Troitsk, 108840, Russia. Ph.: +7(495) 840-70-62. E-mail: v.spichak@mail.ru

ZAKHAROVA Olga Konstantinovna – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Geoelectromagnetic Research Centre of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. GEMRC, POB 30, Moscow, Troitsk, 108840, Russia. Ph.: +7(495) 840-70-62. E-mail: okzakharova@mail.ru