



ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.83

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-6-19>

Поиск перспективных участков для разведки геотермальных ресурсов на основе комплексного анализа разрезов петро- и теплофизических свойств пород

А.И. Ненюкова^а, В.В. Спичак^б^аРоссийский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия^бЦентр геоэлектromагнитных исследований – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Троицк, г. Москва, Россия

Резюме. Целью работы являлось выделение перспективных участков для разведки геотермальных ресурсов по результатам комплексного анализа разрезов петро- и теплофизических свойств пород. По результатам магнито-теллурических зондирований, проведенных в рассматриваемой геотермальной зоне ранее, и построенных двумерных моделей удельного сопротивления, пористости, проницаемости, температуры, теплопроводности и удельной теплоемкости выполнен комплексный кластерный анализ разрезов всех перечисленных параметров. По всем рассматриваемым параметрам построен кластерный разрез, который по существу является петро- теплофизическим «паспортом» изучаемого участка недр, каждый пространственный кластер которого характеризуется своим набором диапазонов значений рассматриваемых свойств. В геотермальной области Сульц-су-Форе (Франция) выделены два участка, перспективные для бурения разведочных скважин. Один из них соответствует найденному ранее и уже разрабатываемому резервуару петротермальной энергии. Второй расположен на глубинах 2–3 км в другой части разреза и может представлять интерес для проведения новых разведочных работ. Созданная таким образом информационная база является удобным инструментарием для интерактивного отбора участков, перспективных с точки зрения поиска тех или иных ресурсов, и построения так называемой «карты перспективности» участков поверхности для бурения разведочных скважин.

Ключевые слова: геотермальная зона, разведочное бурение, кластерный анализ, температура, пористость, проницаемость, теплопроводность, удельная теплоемкость, карта перспективности

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

Для цитирования: Ненюкова А.И., Спичак В.В. Поиск перспективных участков для разведки геотермальных ресурсов на основе комплексного анализа разрезов петро- и теплофизических свойств пород // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 6–19. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-6-19>.

GEOPHYSICS

Original article

Search for promising locations to explore geothermal resources based on joint analysis of sections of petro- and thermophysical properties of rocks

Alena I. Nenyukova^a, Vyacheslav V. Spichak^b^aSergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia^bCenter for Geoelectromagnetic Research – branch of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Troitsk, Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the study is identification of locations promising for geothermal resource exploration based on the joint analysis of sections of petro- and thermophysical properties of rocks. Having conducted magnetotelluric sounding in the geothermal area under investigation and having built 2-D models of electrical resistivity, porosity, permeability, temperature, thermal conductivity and specific heat capacity, the authors performed a joint cluster analysis of sections of



enumerated parameters. A cluster cross-section is constructed taking into account all the discussed parameters, which is essentially a petro- and thermophysical “passport” of the site under examination. Each cluster of the latter is characterized by its own set of property ranges. Two promising locations for drilling exploratory boreholes have been identified in the Soultz-sous-Forêts (France) geothermal area. One of them corresponds to the already developed reservoir of petrothermal energy, while another is located at the depths of 2–3 km in another part of the section and has a potential for future exploration works. The information base created on this basis is a convenient tool for interactive selection of sites promising for exploration of different deposits and building of a “prospectivity map” of surface sites for drilling exploration boreholes.

Keywords: geothermal zone, exploration drilling, cluster analysis, temperature, porosity, permeability, thermal conductivity, specific heat capacity, prospectivity map

Funding: The study was funded by the Russian Science Foundation (grant no. 20-17-00155).

For citation: Nenyukova A.I., Spichak V.V. Search for promising locations to explore geothermal resources based on joint analysis of sections of petro- and thermophysical properties of rocks. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):6-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-6-19>.

Введение

Источниками геотермальной энергии чаще всего служат природные горячие воды или пар, которые могут применяться для непосредственного обогрева зданий либо для получения электрической энергии. Геотермальные ресурсы разделяют на гидротермальные, предполагающие использование подвижных теплоносителей – природного пара, термальных вод и пароводных смесей [1], а также петротермальные, использующие энергию горячих твердых пород и их расплавов, которая может быть извлечена в их теплообмене с техногенным подвижным теплоносителем [2–4]. Поскольку в первом случае носителем тепла являются флюиды, то для поиска их источников и каналов транспортировки к поверхности используют методы электромагнитного (чаще всего магнитотеллурического) зондирования, наиболее чувствительные к типу и объему флюидов [5–13]. В то же время применение петротермальной энергетики основывается на том тепле, которое можно получать не только из подземных вод, но и из сухих твердых пород (так называемые «инженерные» системы, или HDR (*англ.*: Hot Dry Rocks)).

В обоих случаях для повышения эффективности поиска геотермальных ресурсов используют стратегии, учитывающие геологию местности, уровень теплового потока на поверхности и другие факторы¹. Важным элементом такой стратегии является построение предварительной концептуальной модели участка, основанной на качественном анализе всей имеющейся геолого-геофизической информации [14–16]. Тем не менее для поиска

геотермальных ресурсов на глубинах, превышающих глубины пробуренных скважин (в большей степени это касается петротермальных месторождений), необходимым условием является построение глубинных моделей петро- и теплофизических свойств недр и их последующий комплексный анализ.

На сегодняшний день известно много методов комплексного количественного анализа геофизической информации [17, 18]. Среди них можно выделить методы распознавания образов (в частности кластерный анализ), позволяющие находить области в пространстве рассматриваемых параметров со схожими свойствами, а затем квалифицировать их как потенциальные индикаторы тех или иных явлений / процессов или как кластеры петрофизических свойств среды, характеризующие ту или иную литологию [19–24].

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы на основе современных достижений в развитии методов кластерного анализа оценить возможность его применения для поиска целей разведочного бурения геотермальных скважин. Для этого мы использовали результаты магнитотеллурических зондирований в геотермальной зоне Сульц-су-Форе (Франция), а также модели других петро- и теплофизических свойств, построенные вдоль того же профиля в последнее время [25–27].

Материалы и методы исследования

Геотермальная область Сульц-су-Форе расположена в пределах Верхне-Рейнского грабена (рис. 1), который является частью

¹ Best practices guide for geothermal exploration. Bochum: IGA Service GmbH, 2014. 194 p.



европейской кайнозойской рифтовой системы, простирающейся от Средиземноморского побережья до предгорья Альп. Наблюдаемый в этой области рельеф границы Мохо представляет собой куполообразную структуру под Рейнским грабеном. Геотермальные скважины расположены внутри Верхне-Рейнского грабена и локально проникают в так называемый Сульцевский горст (см. вставку на рис. 1), составленный из осадков кайнозойской и мезозойской формаций (от триаса до средней юры), лежащих на палеозойском кристаллическом фундаменте.

В ходе геотермального проекта в регионе Сульц-су-Форе, начавшегося в 1986 г., было пробурено пять глубоких скважин. На рис. 1 (вставка) показаны скважины GPK2, GPK3 и GPK4, используемые в настоящее время для эксплуатации высокоэнталийного резервуара, обнаруженного в низах осадочного чехла.

По результатам магнитотеллурических зондирований, проведенных в рассматриваемой геотермальной зоне ранее вдоль профиля АВ (см. вставку на рис. 1), и измерений в скважинах в работах [7–12] были построены двумерные модели удельного сопротивления, пористости, проницаемости, температуры, теплопроводности и удельной теплоемкости (рис. 2).

Для выделения петро-теплофизических индикаторов геотермального резервуара был проведен кластерный анализ как всех перечисленных параметров, так и отдельных групп, составленных из их числа. Основными элементами комплексного кластерного анализа являлись: метод главных компонент (*англ.*: PCA, Principal Component Analysis), метод самоорганизующихся карт (*англ.*: SOM, Self-Organizing Map) и кластеризация методом К-средних. На рис. 3 показана общая блок-схема процесса, который описывается ниже.

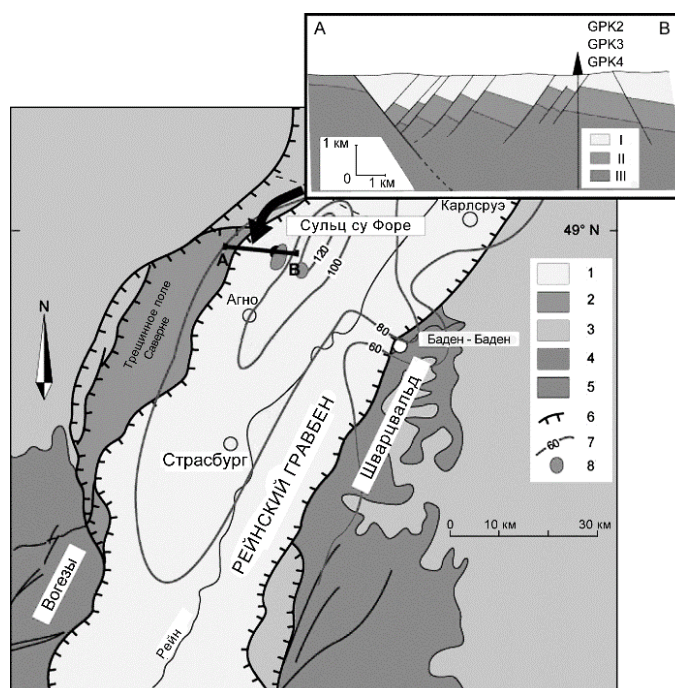


Рис. 1. Геотермальная область Сульц-су-Форе (Франция) и геология Верхне-Рейнского грабена [25]:

1 – кайнозойские осадки; 2 – кайнозойские вулканогенные породы; 3 – юрские отложения;
4 – триасовые отложения; 5 – герцинский фундамент; 6 – граничные разломы;
7 – изолинии температуры, °С, на глубине 1500 м; 8 – локальные термальные аномалии
На вставке приведен упрощенный геологический разрез области
(АВ – профиль магнитотеллурических зондирований):

I – кайнозойские заполняющие осадки; II – мезозойские осадки; III – гранитное основание

Fig. 1. Geothermal area of Soutz-sous-Forêts (France) and geology of the Upper Rhine graben [25]:

1 – Cenozoic sediments; 2 – Cenozoic volcanic rocks; 3 – Jurassic deposits; 4 – Triassic deposits; 5 – Hercynian basement; 6 – boundary faults; 7 – temperature isolines, °C at 1500 m depth; 8 – local thermal anomalies

The insert box demonstrates a schematic geological section of the region (AB is a profile of magnetotelluric sounding):

I – Cenozoic filling sediments; II – Mesozoic sediments; III – granite basement

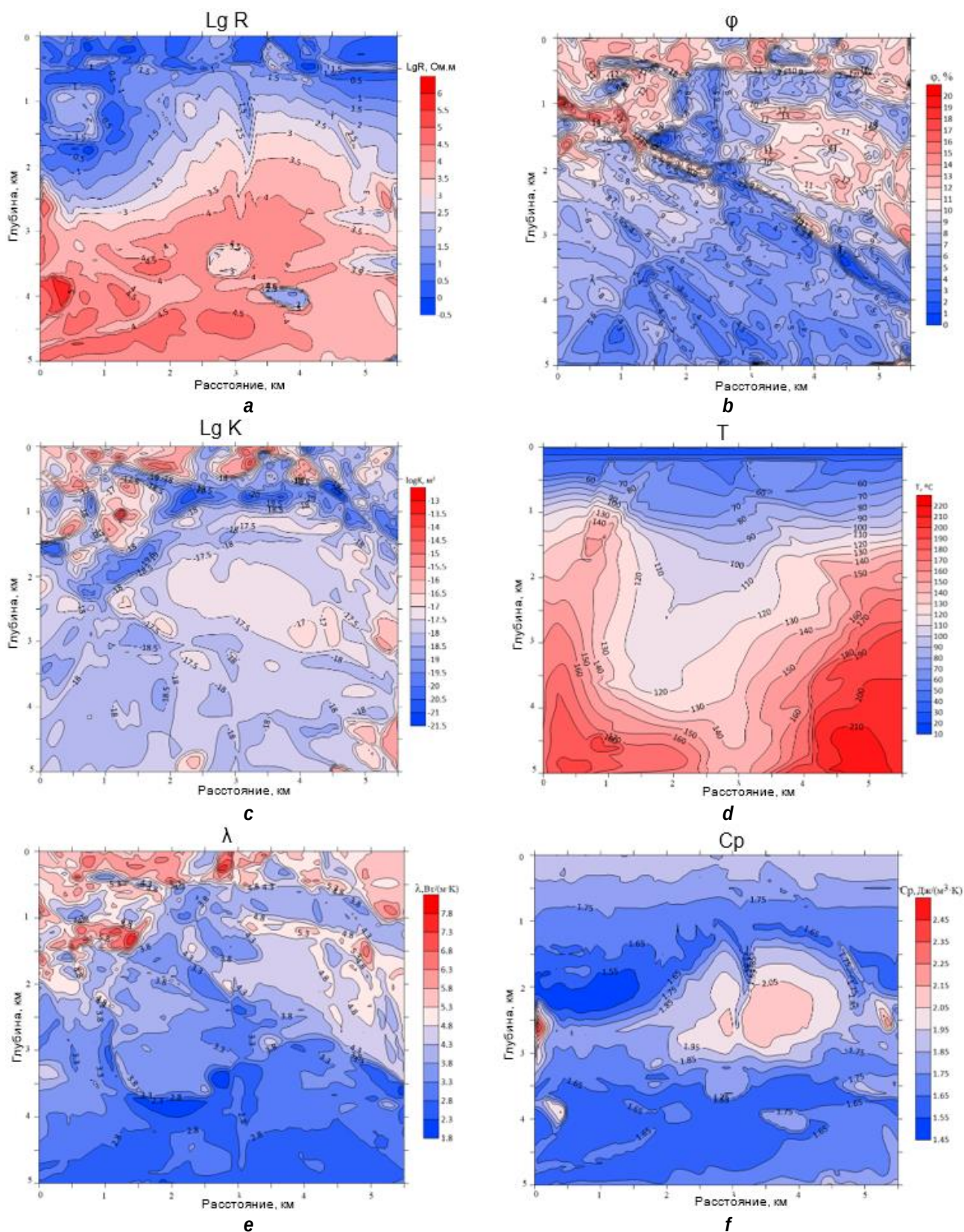


Рис. 2. Разрезы логарифма удельного сопротивления (а), пористости (b), логарифма проницаемости (с), температуры (d), теплопроводности (е) и удельной теплоемкости (f)
Fig. 2. Sections of specific resistivity logarithm (a), porosity (b), permeability logarithm (c), temperature (d), thermal conductivity (e) and specific heat capacity (f)

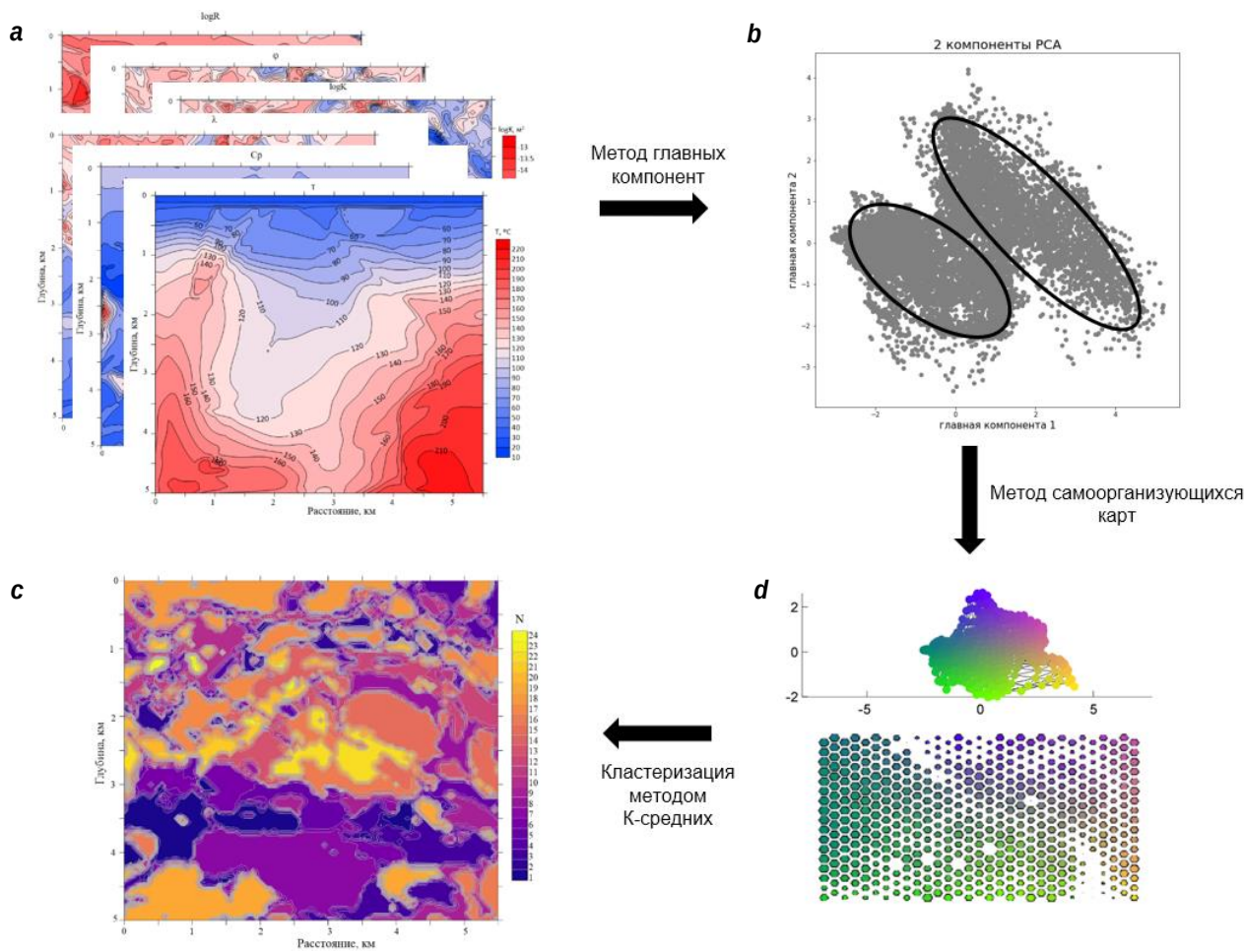


Рис. 3. Общая блок-схема обработки информации:

a – разрезы петро- и теплофизических параметров; *b* – результат выделения главных компонент; *c* – результат кластеризации; *d* – кластерный разрез в пространстве географических координат

Fig. 3. General block flow diagram of data processing:

a – sections of petro- and thermophysical parameters; *b* – result of principal components selection; *c* – clustering result; *d* – cluster section in the geographical coordinate space

Метод главных компонент. В первую очередь при анализе данных использовался метод главных компонент – один из основных способов уменьшения размерности данных при наименьшей потере количества информации. Нахождение главных компонент сводилось к вычислению собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы исходных данных. В этом случае данные преобразовывались в два вектора, с которыми производились дальнейшие операции для определения геометрии и размера будущей карты SOM. Отношение длины и ширины карты приблизительно соответствует отношению длин двух собственных векторов.

Метод самоорганизующихся карт. Далее был применен метод самоорганизующихся карт – неконтролируемый метод машинного обучения, используемый для получения низко-

размерного представления набора данных более высокой размерности с сохранением топологической структуры данных. Идея метода сводилась к введению априорной информации об оптимальном числе кластеров и обучению искусственной нейросети Кохонена выделению в исследуемом пространстве земных недр пространственных участков с однотипными характеристиками.

Искусственная нейронная сеть Кохонена (SOM) представляла собой двуслойную сеть: каждый нейрон первого (входного) слоя был соединен со всеми нейронами второго (выходного) слоя, которые расположены в виде двумерной решетки (карты). Нейроны входного слоя соответствуют физическим свойствам пород, нейроны выходного слоя – кластерным элементам, количество которых задается извне и определяет максимальное



количество групп – кластеров, на которые система может разделить входные данные. В процессе обучения на вход такой нейросети последовательно подавались обучающие примеры, которые представляли собой значения физических свойств пород в одних и тех же узлах координатной сетки.

Таким образом, с помощью самоорганизующихся карт Кохонена происходило преобразование многомерного пространства физических свойств в карту SOM, в которой фиксировано положение каждого компонента в системе осей двух собственных векторов. С помощью цветового кодирования компонент выделялись участки с однотипными характеристиками.

Кластеризация методом K-средних. Для создания кластерного разреза использовался метод K-средних – итерационный метод поиска набора центроидов, наилучшим образом представляющий распределение обучающих наблюдений. Метод относит каждое обучающее наблюдение к одному из K-кластеров таким образом, чтобы каждый кластер был представлен центроидом соответствующих наблюдений, а каждое наблюдение отстояло бы от центроида своего кластера меньше, чем от центроидов других кластеров. Кластеризация происходила на данных метода самоорганизующихся карт, полученных на предыдущем шаге, что значительно уменьшило разброс рассматриваемых параметров.

Результаты исследования и их обсуждение

Обработка информации в соответствии со схемой, показанной на рис. 3, осуществлялась с использованием пакета программ KK Analysis, в котором перечисленные выше методы и процедуры реализованы и тестированы на многочисленных наборах геофизических данных [24].

Критерий останова итерационного процесса. Для того чтобы избежать традиционно субъективного задания числа кластеров, в работе применялся подход, основанный на априорной оценке оптимальной степени кластеризации с помощью специального индекса Дэвиса – Боулдина *DBI* [28]. Он вычислялся в ходе итерационного процесса кластеризации как отношение суммарной «внутренней» дис-

персии (сумма расстояний между членами каждого кластера от центроида) к «внешней» дисперсии (расстояние между центроидами кластеров):

$$DBI = 1/K \sum_k D_k = 1/K \sum_k \max \left(\frac{s_i + s_j}{\|c_i - c_j\|} \right),$$

где K – общее количество кластеров; s_i и s_j – показатели дисперсии в каждом кластере; c_i и c_j – соответствующие векторы центроидов кластеров.

Оценка влияния предварительного выделения главных компонент на скорость процесса кластеризации. С целью оценки влияния предварительного выделения главных компонент на скорость сходимости процесса кластеризации исследования проводились в двух вариантах: с использованием метода главных компонент и без него. При этом количество главных компонент задавалось извне и в ходе экспериментов изменялось от 2 до 5. На рис. 4 показаны графики зависимости значений индекса *DBI* от количества кластеров с использованием метода главных компонент для предварительного выделения главных компонент и без него. В целом при использовании анализа главных компонент индекс *DBI* имел меньшее значение, чем без его использования. При этом оптимальным (с точки скорости сходимости процесса кластеризации) было выделение двух главных компонент, а минимальное значение индекса *DBI* (равное 0,7) достигалось при количестве кластеров, равном 24.

Оценка влияния числа априорно задаваемых кластеров на результаты кластеризации. Для оценки «качества» кластеризации в зависимости от числа кластеров проводилось специальное исследование динамики кластерного разреза при использовании метода главных компонент с выделением двух главных компонент, в котором число используемых кластеров N искусственно задавалось априори ($N = 5, 10, 15, 20, 24$), а не оценивалось в зависимости от скорости сходимости, как выше. Как и следовало ожидать, с ростом числа кластеров разрешение структуры растет и при $N = 24$ достигает своего наибольшего значения (рис. 5). При меньшем количестве априорно задаваемых кластеров разрешение структуры было бы недостаточным, а при большем приводило бы к неоправданным затратам времени.

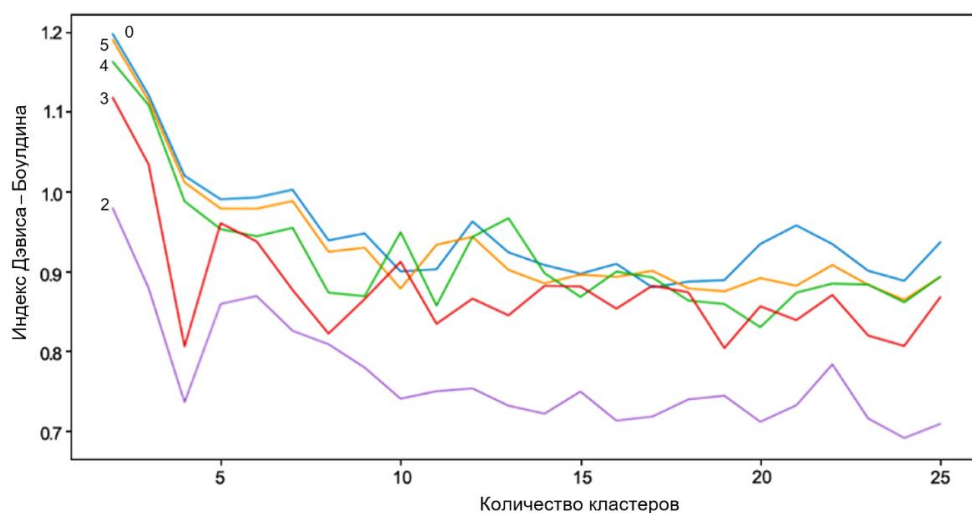


Рис. 4. График зависимости значений индекса Дэвиса – Боулдина от количества кластеров без использования метода главных компонент и при его использовании с выделением разного количества главных компонент

Индексы на графиках указывают количество выделенных главных компонент

Fig. 4. Davis – Bouldin index values vs number of clusters independently of the principal component method and using it with the selection of a different number of principal components

Indexes on the graphs indicate the number of distinguished principal components

Построенный кластерный разрез (см. рис. 5, е) и соответствующие диапазоны значений всех рассмотренных параметров (табл. 1) по существу являются «паспортом» изучаемого участка недр, каждый кластер которого характеризуется своим набором диапазонов значений параметров. Такая широкая информационная база, в которую могут быть добавлены, например, разрезы пористости и модулей упругости, удобна для последующего интерактивного выбора участка земных недр, перспективного с точки зрения оптимизации заданной функции цели. При этом в каждом конкретном случае выбор параметров, по которым решается задача кластеризации, определяется извне в зависимости от имеющихся данных и поставленных целей.

Поиск участков, перспективных для разработки петротермальных ресурсов. В качестве примера рассмотрим задачу выбора участков земных недр, перспективных с точки зрения проведения поисковых геолого-геофизических работ по выбору места для разведочного бурения геотермальной скважины. В контексте поиска петротермальных ресурсов такими целевыми параметрами могут быть температура T , проницаемость K и удельная теплоемкость C_p пород.

Как и в общем случае, рассмотренном выше, проводилось предварительное исследование,

направленное на оптимизацию вычислительной схемы. В частности, было определено, что достаточно проводить кластеризацию с предварительным выделением двух главных векторов, а оптимальное количество кластеров равно 15.

На рис. 6 и в табл. 2 показаны результаты кластеризации по указанным выше параметрам.

Для поиска участка, перспективного для бурения разведочной скважины, мы решали многокритериальную задачу оптимизации с достаточно мягкими ограничениями по температуре ($T_{cp} > 100$ °C) и минимальной проницаемости ($\text{abs}(\lg K) < 17$) на данных о средних значениях параметров в кластерах.

По результатам оптимизации было определено, что заданным ограничениям удовлетворяют кластеры 8 и 9, которые характеризуются следующими средними значениями параметров:

- кластер 8: $T = 144,7$ °C; $\lg K = -16,9$; $C_p = 1,8$ Дж/(м³·K);
- кластер 9: $T = 103,4$ °C; $\lg K = -16,8$; $C_p = 2$ Дж/(м³·K).

Первый из них расположен на глубинах 0,5–1,5 км в северо-западной части разреза и уже подтвержден бурением трех эксплуатационных скважин (GPK2, GPK3, GPK4), а второй – на глубинах 2–3 км в юго-восточной



части разреза. На рис. 6 показан соответствующий участок поверхности, с которого целе-

сообразно проводить новое разведочное бурение.

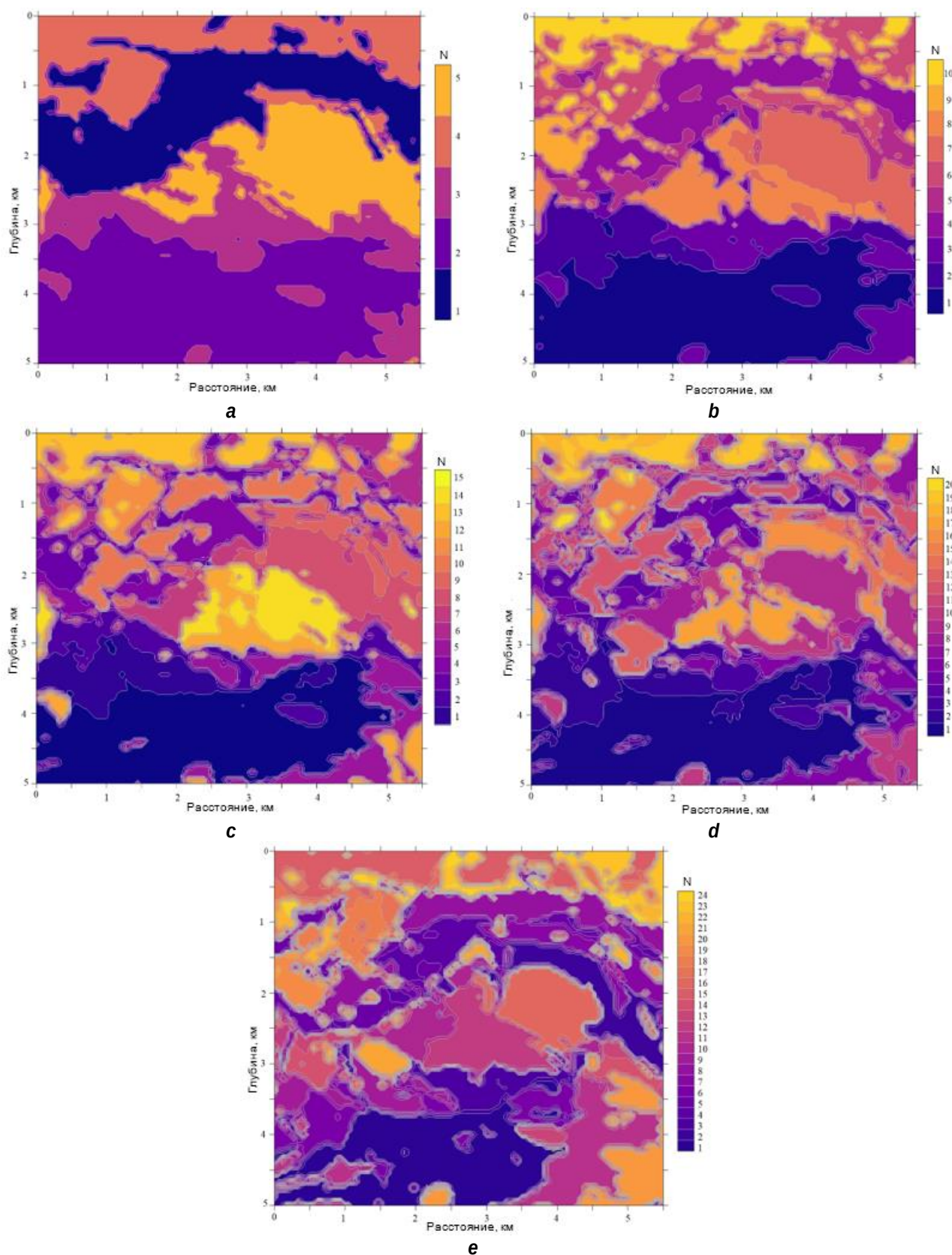


Рис. 5. Кластерные разрезы при числе кластеров, равном 5 (а), 10 (b), 15 (c), 20 (d), 24 (e)
Fig. 5. Cluster sections with the number of clusters that equals 5 (a), 10 (b), 15 (c), 20 (d), 24 (e)



Таблица 1. Диапазоны значений параметров для каждого из 24 кластеров, показанных на рис. 5
Table 1. Parameter value ranges for each of 24 clusters shown in Fig. 5

<i>N</i>	$\lg R$, Ом·м	ϕ , %	$\lg K$, м ²	<i>T</i> , °С	λ , Вт/(м·К)	C_p , Дж/(м ³ ·К)
1	3,3...5,5	2,6...9,7	-19,1...-17,4	112,7...193	2,5...4,6	1,6...1,8
2	0,1...2,6	4...14,2	-19,9...-17,4	20...154,3	3,2...5,7	1,5...1,9
3	3,2...4,5	1,6...8,4	-18,4...-17	131,7...216,6	2,2...4,3	1,6...1,8
4	0...2,6	5,4...20	-19,5...-16,8	20...148,7	4...7,9	1,6...1,9
5	2,7...5,2	2,1...10,9	-18,5...-16,8	102,2...198,2	2,1...4,8	1,7...1,9
6	1...4,7	2,7...8,9	-18,9...-17,1	87,5...207,4	2,8...4,6	1,7...1,9
7	3,4...5,5	1,8...8,2	-18,8...-16,7	116,9...186,1	1,9...3,4	1,6...1,7
8	2,5...3,7	6,9...13,2	-18,5...-16,6	67,3...188,6	3,5...5,4	1,7...2
9	1,6...5,6	2,5...12,1	-18,7...-16,4	118...218,1	2...3,7	1,6...2
10	-0,1...2,2	4,7...19,8	-18,1...-15,7	20...151,4	3,5...7,5	1,6...1,9
11	-0,3...2,5	3,4...16,4	-20,5...-16,9	20...154,8	3,3...6,8	1,5...1,9
12	0,7...2,9	7...13,6	-18,4...-16,6	66,5...181,9	3,5...6,3	1,6...1,8
13	2,2...4,2	4...11,8	-18,3...-16,7	90,9...198,6	3...4,7	1,8...2
14	0,9...2,7	3,2...9,9	-18,8...-17,3	47,3...150,9	3,2...4,8	1,5...1,8
15	1,1...4,5	6,8...14,9	-18,2...-15,5	99,1...211,3	2,6...5,3	1,8...2,2
16	1,1...6	1,9...13	-18,5...-15,3	104,9...217,6	2,3...4,7	1,7...2,1
17	0,2...2,6	0,6...12,5	-21,9...-18	20...145,9	3,2...5,4	1,5...1,9
18	-0,4...2,8	7,1...15,2	-17,5...-13,6	20...127,9	4,3...7,7	1,7...2
19	3,4...5,5	0...7,2	-18,6...-17,6	151,3...212,5	2,3...3,6	1,6...1,7
20	-0,2...2,6	4,2...10,7	-18,1...-16,2	56,5...154,8	3,2...5,5	1,5...1,8
21	1,7...3,2	4,3...11,9	-18,5...-16,7	62,7...154	3,1...4,7	1,6...1,9
22	3,3...5	3...9,4	-18,1...-16,8	103...161,7	2,7...5,2	1,9...2,5
23	2...4,1	3,5...6,7	-18,7...-17,4	78,1...146,4	3,2...4,8	1,6...1,8
24	0,3...3,2	9,3...17,4	-17,6...-14,2	88,6...197,2	4,1...7,1	1,7...1,9

Примечание. *N* – номер кластера; *R* – удельное сопротивление; ϕ – пористость; *K* – проницаемость; *T* – температура; λ – теплопроводность; C_p – удельная теплоемкость.

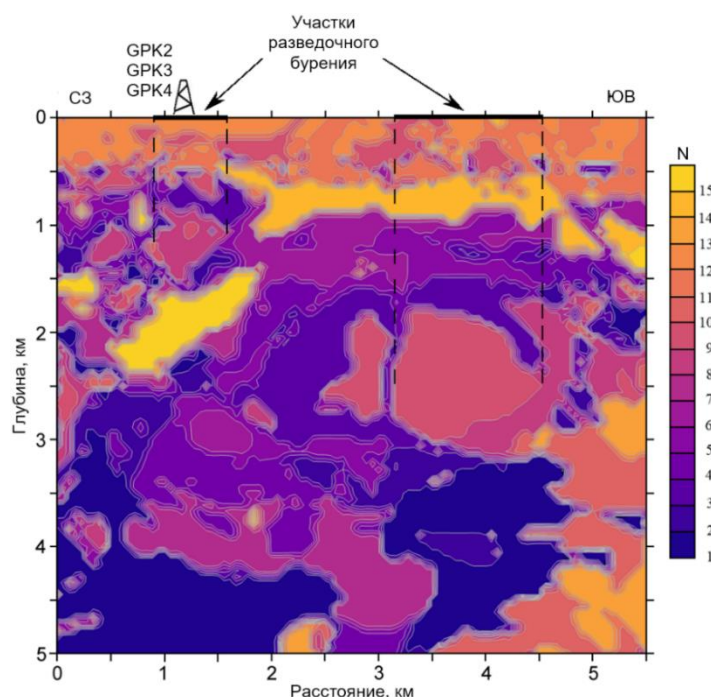


Рис. 6. Кластерный разрез, построенный по данным температуры, проницаемости и удельной теплоемкости
GPK2, GPK2 и GPK4 – эксплуатационные скважины, которые используются в настоящее время для извлечения геотермальных ресурсов

Fig. 6. Cluster section built on temperature, permeability and specific heat capacity data
GPK2, GPK2 and GPK4 are producing wells currently used for geothermal resource extraction



Таблица 2. Диапазоны значений параметров для каждого из 15 кластеров, показанных на рис. 6
Table 2. Parameter value ranges for each of 15 clusters shown in Fig. 6

<i>N</i>	$\lg K, \text{ м}^2$	$T, ^\circ\text{C}$	$C_p, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$
1	-19...-16,8	119,2...213,1	1,5...1,7
2	-19...-16,7	96,8...182,8	1,6...1,9
3	-18,3...-15,8	43,7...146,7	1,7...2
4	-19,1...-17,1	93,5...164,4	1,6...1,8
5	-18,6...-16,9	64,8...129,6	1,6...1,9
6	-19...-17,7	50,8...121,5	1,6...1,8
7	-19,1... (-17,6	109,9...169	1,5...1,7
8	-18,5...-14,5	76,8...207,4	1,6...2,1
9	-18,1...-13,6	20...178,8	1,7...2,5
10	-18,7...-16,6	137,4...218,1	1,6...1,9
11	-19,5...-17,3	20...89,2	1,7...1,9
12	-18...-15,7	20...63,6	1,8...2
13	-17,2...-15,3	159,2...217,6	1,6...2
14	-21,9...-18,9	20...115,1	1,6...1,9
15	-20,7...-18,6	101,4...146,7	1,5...1,7

Примечание: *N* – номер кластера; *K* – проницаемость; *T* – температура; *C_p* – удельная теплоемкость.

Заключение

Таким образом, в ходе осуществленного исследования по результатам магнитотеллурических зондирований, проведенных в рассматриваемой геотермальной зоне ранее, и построенных двумерных моделей удельного сопротивления, пористости, проницаемости, температуры, теплопроводности и удельной теплоемкости выполнен комплексный кластерный анализ разрезов всех перечисленных параметров, а также отдельных групп, составленных из их числа.

Предложена новая схема проведения кластерного анализа данных, включающая метод главных компонент, метод самоорганизующихся карт и собственно кластеризацию методом *K*-средних. Проведена оптимизация вычислительной схемы, позволившая уйти от основной проблемы кластеризации – необходимости субъективного выбора числа кластеров. Вместо этого в работе применялся подход, основанный на оценке оптимальной степени кластеризации с помощью специального индекса, который вычисляется в ходе итерационного процесса кластеризации.

По всем рассматриваемым параметрам построен кластерный разрез, который по существу является петро-теплофизическим «паспортом» изучаемого участка недр, каждый пространственный (в данном случае двумерный) кластер которого характеризуется своим набором диапазонов значений параметров. Созданная таким образом информационная база является удобным инструментарием для последующего интерактивного отбора участков земных недр, перспективных с точки зрения поиска тех или иных ресурсов, и построения так называемой «карты перспективности» участков поверхности для бурения разведочных скважин.

На основании совместного кластерного анализа построенных разрезов выделены два участка земных недр рассматриваемой геотермальной зоны, перспективные для бурения разведочных геотермальных скважин. Один из них совпадает с найденным ранее и уже разрабатываемым резервуаром петротермальной энергии. Второй расположен на глубинах 2–3 км в другой части разреза и может представлять интерес для проведения новых разведочных работ.

Список источников

1. Manzella A., Serra D., Cesari G., Bargiavchi E., Cei M., Cerutti P., et al. Geothermal energy use, country update for Italy // European Geothermal Congress 2019 (Den Haag, 11–14 June 2019). Den Haag, 2019. P. 1–19.

2. Olasolo P., Juárez M.C., Morales M.P., D'Amico S., Liarte I.A. Enhanced geothermal systems (EGS): a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 56. P. 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.031>.



3. Fridleifsson G.O., Bogason S.G., Stoklosa A.W., Ingolfsson H.P., Vergnes P., Thorbjörnsson I.Ö., et al. Deployment of deep enhanced geothermal systems for sustainable energy business // *European Geothermal Congress 2016* (Strasbourg, 19–24 September 2016). Strasbourg, 2016. P. 1–8.
4. Koelbel T., Genter A. Enhanced geothermal systems: the Soultz-sous-Forêts project // *Towards 100 % Renewable Energy* / ed. T. Uyar. Cham: Springer, 2017. P. 243–248.
5. Muñoz G. Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods // *Surveys in Geophysics*. 2014. Vol. 35. P. 101–122. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9236-0>.
6. Amatyakul P., Wood S.H., Rung-arunwan T., Vachirienchai C., Prommakorn N., Chanapiwat P., et al. An assessment of a shallow geothermal reservoir of Mae Chan hot spring, northern Thailand via magnetotelluric surveys // *Geothermics*. 2021. Vol. 95. P. 102137. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102137>.
7. Bertrand E., Caldwell T.G., Hill G.J., Bennie S.L. 3-D inversion of a 200+ site magnetotelluric array for deep geothermal exploration // *5th International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics* (Sapporo, 7–9 May 2013). Sapporo, 2013. P. 1–3.
8. Heise W., Caldwell T.G., Bibby H.M., Bannister S.C. Three-dimensional modelling of magnetotelluric data from the Rotokawa geothermal field, Taupo Volcanic Zone, New Zealand // *Geophysical Journal International*. 2008. Vol. 173. Iss. 2. P. 740–750. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03737.x>.
9. Maryadi M., Firdaus A., Zarkasyi A., Mizunaga H. Electrical resistivity structure of Danau Ranau geothermal prospect area based on integrated 3-D inversion of impedance tensor and tipper vector // *Geothermics*. 2022. Vol. 106. P. 102575. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102575>.
10. Pace F., Martí A., Queralt P., Santilano A., Manzella A., Ledo J., et al. Three-dimensional magnetotelluric characterization of the Travale geothermal field (Italy) // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Iss. 3. P. 542. <https://doi.org/10.3390/rs14030542>.
11. Peacock J.R., Mangan M.T., McPhee D., Wnnamaker P.E. Three-dimensional electrical resistivity model of the hydrothermal system in Long Valley Caldera, California from magnetotellurics // *Geophysical Research Letters*. 2016. Vol. 43. Iss. 15. P. 7953–7962. <https://doi.org/10.1002/2016GL069263>.
12. Uchida T. Three-dimensional magnetotelluric investigation in geothermal fields in Japan and Indonesia // *World Geothermal Congress 2005* (Antalya, 24–29 April 2005). Antalya, 2005. P. 1–12.
13. Wannamaker P.E., Jiracek G.R., Stodt J.A., Caldwell T.G., Gonzales V.M., McKnight J.D., et al. Fluid generation and pathways beneath an active compressional orogen, the New Zealand Southern Alps, inferred from magnetotelluric data // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2002. Vol. 107. Iss. B6. P. 6–20. <https://doi.org/10.1029/2001JB000186>.
14. Heap M.J., Kushnir A.R., Gilg H.A., Violay M.E., Harlé P., Baud P. Petrophysical properties of the Muschelkalk from the Soultz-sous-Forêts geothermal site (France), an important lithostratigraphic unit for geothermal exploitation in the Upper Rhine Graben // *Geothermal Energy*. 2019. Vol. 7. P. 27. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0145-4>.
15. Gola G., Bertini G., Bonini M., Botteghi S., Brogi A., De Franco R., et al. Data integration and conceptual modelling of the Larderello geothermal area, Italy // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 125. P. 300–309. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.201>.
16. Oka D., Tamura M., Mogi T., Nakagawa M., Takahashi H., Ohzono M., et al. Conceptual model of supercritical geothermal system in Shiribeshi Region, Hokkaido, Japan // *Geothermics*. 2023. Vol. 108. P. 102617. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102617>.
17. Спичак В.В. Современные методы комплексного анализа и инверсии геофизических данных // *Геология и геофизика*. 2020. Т. 61. № 3. С. 422–443. <https://doi.org/10.15372/GiG2019092>.
18. Integrated imaging of the Earth: Theory and applications / M. Moorkamp, P.G. Lelièvre, N. Linde, A. Khan (eds.). New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 253 p.
19. Bauer K., Muñoz G., Moeck I. Pattern recognition and lithological interpretation of collocated seismic and magnetotelluric models using self-organizing maps // *Geophysical Journal International*. 2012. Vol. 189. Iss. 2. P. 984–998. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05402.x>.
20. Brehme M., Bauer K., Nukman M., Regenspurg S. Self-organizing maps in geothermal exploration – a new approach for understanding geochemical processes and fluid evolution // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2017. Vol. 336. P. 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.01.013>.
21. Carollo A., Capizzi P., Martorana R. Joint interpretation of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography by cluster analysis to detect buried cavities // *Journal of Applied Geophysics*. 2020. Vol. 178. P. 104069. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104069>.
22. Di Giuseppe M.G., Troiano A., Patella D., Piochi M., Carlino S. A geophysical k-means cluster analysis of the Solfatara-Pisciarelli volcano-geothermal system, Campi Flegrei (Naples, Italy) // *Journal of Applied Geophysics*. 2018. Vol. 156. P. 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.06.001>.
23. Lindsey C.R., Neupane G., Spycher N., Fairley J.P., Dobson P., Wood T., et al. Cluster analysis as a tool for evaluating the exploration potential of Known Geothermal Resource Areas // *Geothermics*. 2018. Vol. 72. P. 358–370. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.12.009>.
24. Langer H., Falsaperla S., Hammer C. Advantages and pitfalls of pattern recognition: selected cases in geophysics. Amsterdam: Elsevier, 2020. 333 p.
25. Спичак В.В. Электромагнитная томография земных недр. М.: Научный мир, 2019. 373 с.
26. 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. Iss. 4. P. 397–408. <https://doi.org/10.3997/>



1873-0604.2015014.

27. Spichak V., Zakharova O. Permeability estimating beyond boreholes from electrical conductivity data determined from magnetotelluric sounding: Soultz-sous-Forêts site (France) case study // *Geothermics*. 2022. Vol. 105.

P. 102513. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102513>.

28. Davies D.L., Bouldin D.W. A cluster separation measure // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1979. Vol. PAMI-1. Iss. 2. P. 224–227. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1979.4766909>.

References

1. Manzella A., Serra D., Cesari G., Bargiavichi E., Cei M., Cerutti P., et al. Geothermal energy use, country update for Italy. In: *European Geothermal Congress 2019*. 11–14 June 2019, Den Haag. Den Haag; 2019, p. 1–19.

2. Olasolo P., Juárez M.C., Morales M.P., D'Amico S., Liarte I.A. Enhanced geothermal systems (EGS): a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56: 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.031>.

3. Fridleifsson G.O., Bogason S.G., Stoklosa A.W., Ingolfsson H.P., Vergnes P., Thorbjörnsson I.Ö., et al. Deployment of deep enhanced geothermal systems for sustainable energy business. In: *European Geothermal Congress 2016*. 19–24 September 2016, Strasbourg. Strasbourg; 2016, p. 1–8.

4. Koelbel T., Genter A. Enhanced geothermal systems: the Soultz-sous-Forêts project. In: Uyar T. (ed.). *Towards 100 % Renewable Energy*. Cham: Springer; 2017, p. 243–248.

5. Muñoz G. Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods. *Surveys in Geophysics*. 2014; 35:101-122. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9236-0>.

6. Amatyakul P., Wood S.H., Rung-arunwan T., Vachiriatienchai C., Prommakorn N., Chanapiwat P., et al. An assessment of a shallow geothermal reservoir of Mae Chan hot spring, northern Thailand via magnetotelluric surveys. *Geothermics*. 2021;95:102137. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102137>.

7. Bertrand E., Caldwell T.G., Hill G.J., Bennie S.L. 3-D inversion of a 200+ site magnetotelluric array for deep geothermal exploration. In: *5th International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics*. 7–9 May 2013, Sapporo. Sapporo; 2013, p. 1–3.

8. Heise W., Caldwell T.G., Bibby H.M., Bannister S.C. Three-dimensional modelling of magnetotelluric data from the Rotokawa geothermal field, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geophysical Journal International*. 2008;173(2): 740-750. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03737.x>.

9. Maryadi M., Firdaus A., Zarkasyi A., Mizunaga H. Electrical resistivity structure of Danau Ranau geothermal prospect area based on integrated 3-D inversion of impedance tensor and tipper vector. *Geothermics*. 2022;106: 102575. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102575>.

10. Pace F., Martí A., Queralt P., Santilano A., Manzella A., Ledo J., et al. Three-dimensional magnetotelluric characterization of the Travale geothermal field (Italy). *Remote Sensing*. 2022;14(3):542. <https://doi.org/10.3390/rs14030542>.

11. Peacock J.R., Mangan M.T., McPhee D., Wannamaker P.E. Three-dimensional electrical resistivity model of the hydrothermal system in Long Valley Caldera, California from magnetotellurics. *Geophysical Research Letters*. 2016;43(15):7953-7962. <https://doi.org/10.1002/>

2016GL069263.

12. Uchida T. Three-dimensional magnetotelluric investigation in geothermal fields in Japan and Indonesia. In: *World Geothermal Congress 2005*. 24–29 April 2005, Antalya. Antalya; 2005, p. 1–12.

13. Wannamaker P.E., Jiracek G.R., Stodt J.A., Caldwell T.G., Gonzales V.M., McKnight J.D., et al. Fluid generation and pathways beneath an active compressional orogen, the New Zealand Southern Alps, inferred from magnetotelluric data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2002;107(B6):6–20. <https://doi.org/10.1029/2001JB000186>.

14. Heap M.J., Kushnir A.R., Gilg H.A., Violay M.E., Harlé P., Baud P. Petrophysical properties of the Muschelkalk from the Soultz-sous-Forêts geothermal site (France), an important lithostratigraphic unit for geothermal exploitation in the Upper Rhine Graben. *Geothermal Energy*. 2019;7:27. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0145-4>.

15. Gola G., Bertini G., Bonini M., Botteghi S., Brogi A., De Franco R., et al. Data integration and conceptual modelling of the Larderello geothermal area, Italy. *Energy Procedia*. 2017;125:300-309. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.201>.

16. Oka D., Tamura M., Mogi T., Nakagawa M., Takahashi H., Ohzono M., et al. Conceptual model of supercritical geothermal system in Shiribeshi Region, Hokkaido, Japan. *Geothermics*. 2023;108:102617. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102617>.

17. Spichak V.V. Modern methods for joint analysis and inversion of geophysical data. *Geologiya i geofizika*. 2020;61(3):422-443. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG2019092>.

18. Moorkamp M., Lelièvre P.G., Linde N., Khan A. *Integrated imaging of the Earth: Theory and applications*. New Jersey: John Wiley & Sons; 2016. 253 p.

19. Bauer K., Muñoz G., Moeck I. Pattern recognition and lithological interpretation of collocated seismic and magnetotelluric models using self-organizing maps. *Geophysical Journal International*. 2012;189(2):984-998. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05402.x>.

20. Brehme M., Bauer K., Nukman M., Regenspurg S. Self-organizing maps in geothermal exploration – a new approach for understanding geochemical processes and fluid evolution. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2017;336:19-32. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.01.013>.

21. Carollo A., Capizzi P., Martorana R. Joint interpretation of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography by cluster analysis to detect buried cavities. *Journal of Applied Geophysics*. 2020;178:104069. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104069>.



22. Di Giuseppe M.G., Troiano A., Patella D., Piochi M., Carlino S. A geophysical *k*-means cluster analysis of the Solfatara-Pisciarelli volcano-geothermal system, Campi Flegrei (Naples, Italy). *Journal of Applied Geophysics*. 2018;156:44-54. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.06.001>.

23. Lindsey C.R., Neupane G., Spycher N., Fairley J.P., Dobson P., Wood T., et al. Cluster analysis as a tool for evaluating the exploration potential of Known Geothermal Resource Areas. *Geothermics*. 2018;72:358-370. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.12.009>.

24. Langer H., Falsaperla S., Hammer C. *Advantages and pitfalls of pattern recognition: selected cases in geophysics*. Amsterdam: Elsevier; 2020. 333 p.

25. Spichak V.V. *Electromagnetic tomography of the Earth's interior*. Moscow: Nauchnyi mir; 2019. 373 p.

(In Russ.).

26. 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;13(4):397-408. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2015014>.

27. Spichak V., Zakharova O. Permeability estimating beyond boreholes from electrical conductivity data determined from magnetotelluric sounding: Soultz-sous-Forêts site (France) case study. *Geothermics*. 2022;105:102513. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102513>.

28. Davies D.L., Bouldin D.W. A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1979;PAMI-1(2):224-227. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1979.4766909>.

Информация об авторах / Information about the authors



Ненюкова Алёна Игоревна,

студентка,
Российский государственный геологоразведочный
университет им. Серго Орджоникидзе,
г. Москва, Россия,
nenyukovaai@mail.ru

Alena I. Nenyukova,

Student,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,
Moscow, Russia,
nenyukovaai@mail.ru



Спичак Вячеслав Валентинович,

доктор физико-математических наук,
академик Российской академии естественных наук,
заведующий Лабораторией методологии интерпретации
электромагнитных данных,
Центр геоэлектромагнитных исследований – филиал
Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
г. Троицк, г. Москва, Россия

✉ v.spichak@mail.ru

<https://orcid.org/89262243578>

Vyacheslav V. Spichak,

Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Academician of the Russian Academy of Natural Sciences,
Head of the Laboratory of Electromagnetic Data Interpretation Methodology,
Center for Geoelectromagnetic Research – branch of the
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Troitsk, Moscow, Russia

✉ v.spichak@mail.ru

<https://orcid.org/89262243578>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.



*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 28.01.2023; одобрена после рецензирования 10.02.2023; принята к публикации 28.02.2023.

The article was submitted 28.01.2023; approved after reviewing 10.02.2023; accepted for publication 28.02.2023.