

Геоинформатика. 2023. № 2. С. 57–66.  
*Geoinformatika*. 2023;(2):57–66.

### Решение практических задач

Научная статья  
 УДК 550.83  
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-2-57-66>

## Кластерный анализ свойств разреза с целью поиска участков для бурения разведочных геотермальных скважин

© 2023 г. — Вячеслав Валентинович Спичак<sup>1, а)</sup>, Алёна Игоревна Ненюкова<sup>2, б)</sup>

<sup>1</sup>Центр геоэлектроманнитных исследований ИФЗ РАН; Россия, г. Троицк

<sup>2</sup>Российский государственный геологоразведочный университет; Россия, Москва

<sup>а)</sup>v.spichak@mail.ru, <sup>б)</sup>nenyukovaai@mail.ru

**Аннотация:** 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.

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 геотермальным резервуаром. Второй расположен на глубинах 2–3 км в другой части разреза и может представлять несомненный интерес для проведения новых разведочных работ.

**Ключевые слова:** геотермальная зона, разведочное бурение, кластерный анализ, температура, проницаемость, удельная теплоемкость

Для цитирования: Спичак В.В., Ненюкова А.И. Кластерный анализ свойств разреза с целью поиска участков для бурения разведочных геотермальных скважин // *Геоинформатика*. — 2023. — № 2. — С. 57–66. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-2-57-66>.

### Practical application

Original article

## Cluster analysis of section properties with the aim of searching areas for drilling exploration geothermal wells

© 2023 — Viacheslav V. Spichak<sup>1, а)</sup>, Alena I. Nenyukova<sup>2, б)</sup>

<sup>1</sup>Geoelectromagnetic Research Centre IPE RAS; Troitsk, Russia

<sup>2</sup>Russian State Geological Prospecting University Sergo Ordzhonikidze; Moscow, Russia

<sup>а)</sup>v.spichak@mail.ru, <sup>б)</sup>nenyukovaai@mail.ru

**Abstract:** Basing on the results of magnetotelluric sounding, carried out earlier in the geothermal area under examination and developed 2D-models of electrical resistivity, porosity, permeability, temperature, thermal conductivity and specific heat capacity, an integrated cluster analysis of sections of enumerated parameters is fulfilled.

Combined cluster analysis enabled to detect two subsurface areas promising for drilling exploratory boreholes. One of them coincides with already developed geothermal reservoir, while another one is located at depths 2-3km in another part of the section and may be of great interest for future exploration.

**Key words:** geothermal zone, exploration drilling, cluster analysis, temperature, permeability, specific heat capacity

For citation: Spichak V.V., Nenyukova A.I. Cluster analysis of section properties with the aim of searching areas for drilling exploration geothermal wells. *Geoinformatika*. 2023;(2):57–66. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-2-57-66>. In Russ.

### Введение

В России исторически сложился полуэмпирический подход к комплексной интерпретации измеренных на геотраверсах геофизических данных, в котором совместный анализ отдельных геофизических моделей осуществляется на основании их визуального сравнения, а не с помощью регулярных математических алгоритмов. В результате этого процесса строится так называемая геолого-геофизическая модель, которая затем анализируется в

содержательных терминах на основе опыта интерпретатора. Такой субъективный подход, безусловно, не может служить основой для последующей разработки практических рекомендаций по принятию решений в области рационального природопользования.

В какой-то мере этот недостаток компенсируется за счет применения фокусирующих алгоритмов, в которых первичной целью апостериорного количественного анализа является локализация

областей резкого изменения свойств среды в однометодных моделях [1, 2, 12]. Преимуществом этого подхода является то, что границы областей однородности физических свойств определяются по картам изолиний их экстремумов, естественным образом ограничивающих зоны плавного изменения этих свойств. В тех случаях, когда эти границы для разных однометодных моделей совпадают, удастся построить “геометризованную” модель и в дальнейшем оценить физические свойства соответствующих однородных блоков.

Недостатком этого подхода является то, что если найденные таким образом границы однородных областей для разных физических свойств не совпадают (а это, по-видимому, наиболее частый в практике случай), то надежность всех последующих построений ставится под вопрос. Отметим аналогичный недостаток так называемого “структурного подхода”, основанного на априорном постулировании общей структуры однометодных моделей: если эта гипотеза не соответствует действительности, то общая структура и соответственно ее наполнение могут иметь мало общего с реальностью (см. обзор методов комплексного анализа геофизических данных в работе [3]).

Однако сегодня существуют и другие подходы к построению комплексных моделей среды по геофизическим данным, измеренным вдоль опорных профилей. В частности, в работе [5] на основе кластерного анализа моделей удельного сопротивления и скоростей сейсмических волн была построена комплексная геолого-геофизическая модель сейсмоактивной зоны Тувы, а в работе [6] был сде-

лан прогноз нефтегазоносности участка недр Восточной Сибири. 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 высокоэнтальпийной геотермальной зоне Сульц-су-Форе (Франция), а также модели других параметров, построенные в последнее время.

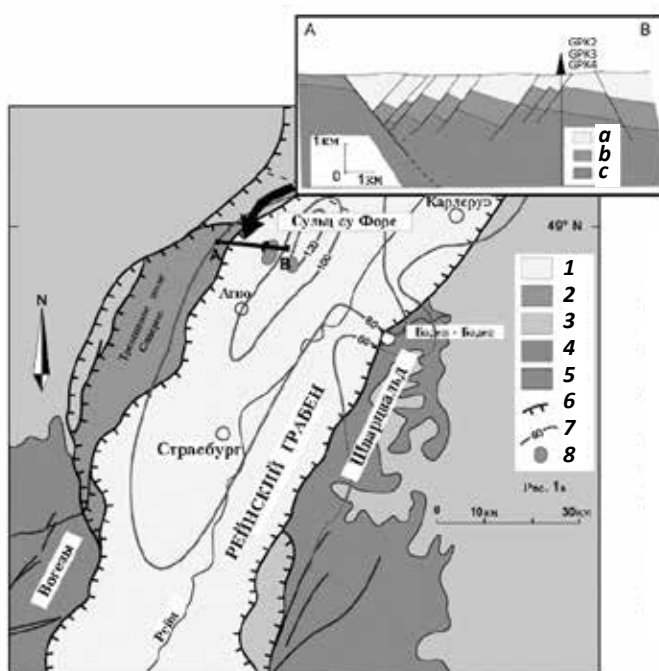
### 1. Геологические сведения

Геотермальная область Сульц-су-Форе расположена в пределах Верхне-Рейнского грабена (рис. 1), который является частью европейской кайнозойской рифтовой системы, простирающейся от Средиземноморского побережья до предгорья Альп. 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 5 глубоких скважин. На рис. 1 (вставка) показаны скважины GPK2, GPK3 и GPK4, используемые в настоящее время для эксплуатации высокоэн-

**Рис. 1.** Геотермальная область Сульц и геология Верхне-Рейнского грабена. На верхней вставке дан упрощенный разрез области Сульц

*Fig. 1. The Soutz geothermal region and the geology of the Upper Rhine graben. The top inset shows a simplified section of the Soutz region*



**a** — кайнозойские заполняющие осадки, **b** — мезозойские осадки, **c** — гранитное основание; **1** — 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

**a** — Cenozoic filling sediments, **b** — Mesozoic sediments, **c** — Granitic basement; **1** — Cenozoic sediments, **2** — Cenozoic volcanogenic rocks, **3** — Jurassic, **4** — Triassic, **5** — Hercynian basement, **6** — Border faults, **7** — Temperature distribution (in °C) at 1500 m depth, **8** — Local thermal anomalies

тальпийного резервуара, обнаруженного в низах осадочного чехла.

## 2. Методика

По результатам магнитотеллурических зондирований, проведенных в рассматриваемой геотермальной зоне ранее вдоль профиля АВ (см. его расположение на рис. 1), и измерений в скважинах в работах [4, 6, 8, 9, 10, 11] 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

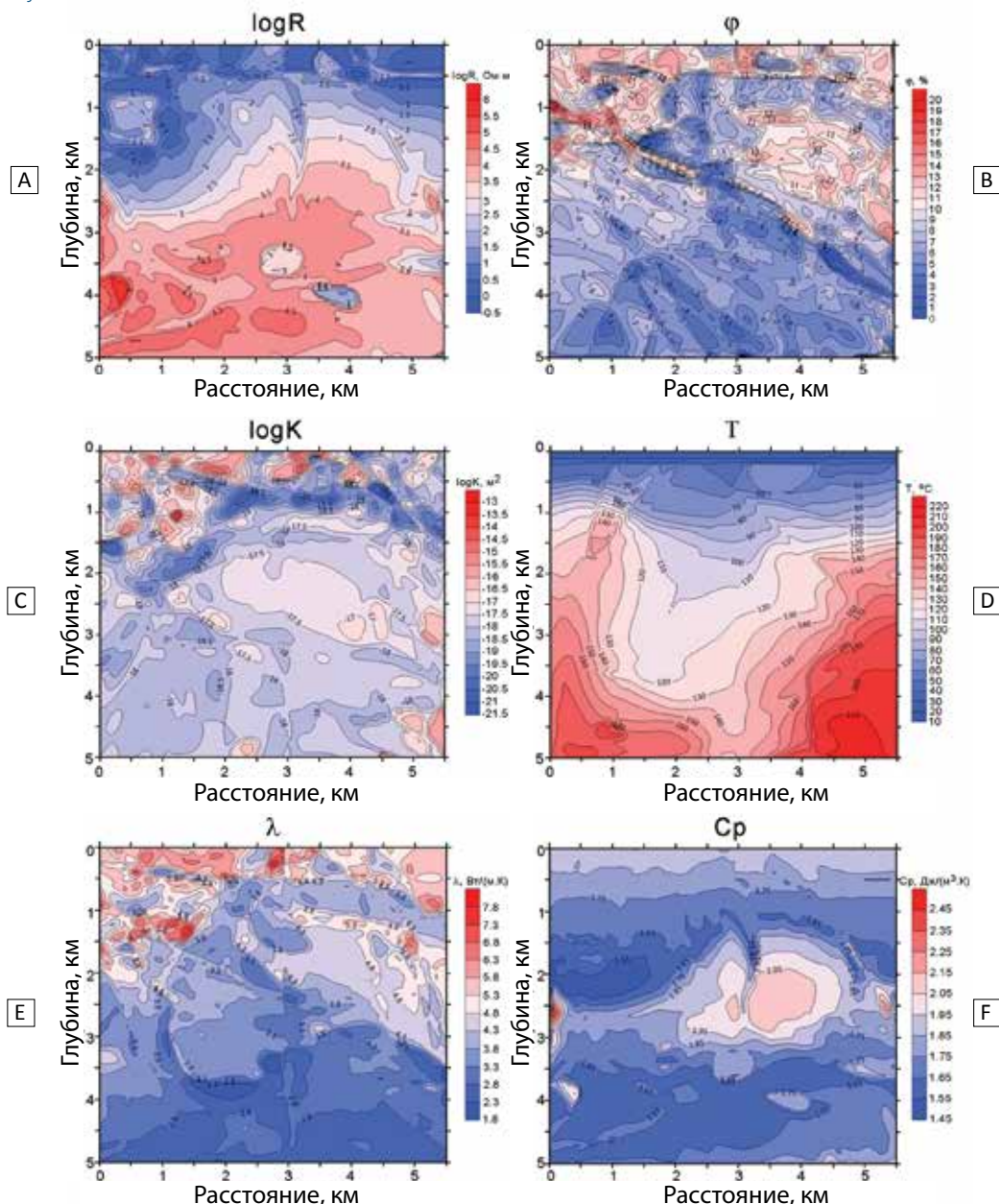
как всех перечисленных параметров, так и отдельных групп, составленных из их числа.

В работе использовался оригинальный подход к комплексному анализу геофизических данных. При этом построение групп основывалось только на значениях свойств и не принимало во внимание информацию о принадлежности примеров конкретной литологической группе, что отличает этот метод от других, в которых для построения статистической модели для классификации используется обучающая выборка.

Основными элементами комплексного кластерного анализа являлись: метод главных компонент (PCA), метод самоорганизующихся карт (SOM)

**Рис. 2.** Разрезы удельного сопротивления (А), пористости (В), проницаемости (С), температуры (D), теплопроводности (E) и удельной теплоемкости (F)

*Fig. 2. Sections of resistivity (A), porosity (B), permeability (C), temperature (D), thermal conductivity (E) and specific heat capacity (F)*



и кластеризация методом  $K$ -средних. На рис. 3 показана общая блок-схема этого процесса, который описывается ниже.

**2.1. Метод главных компонент (PCA)**

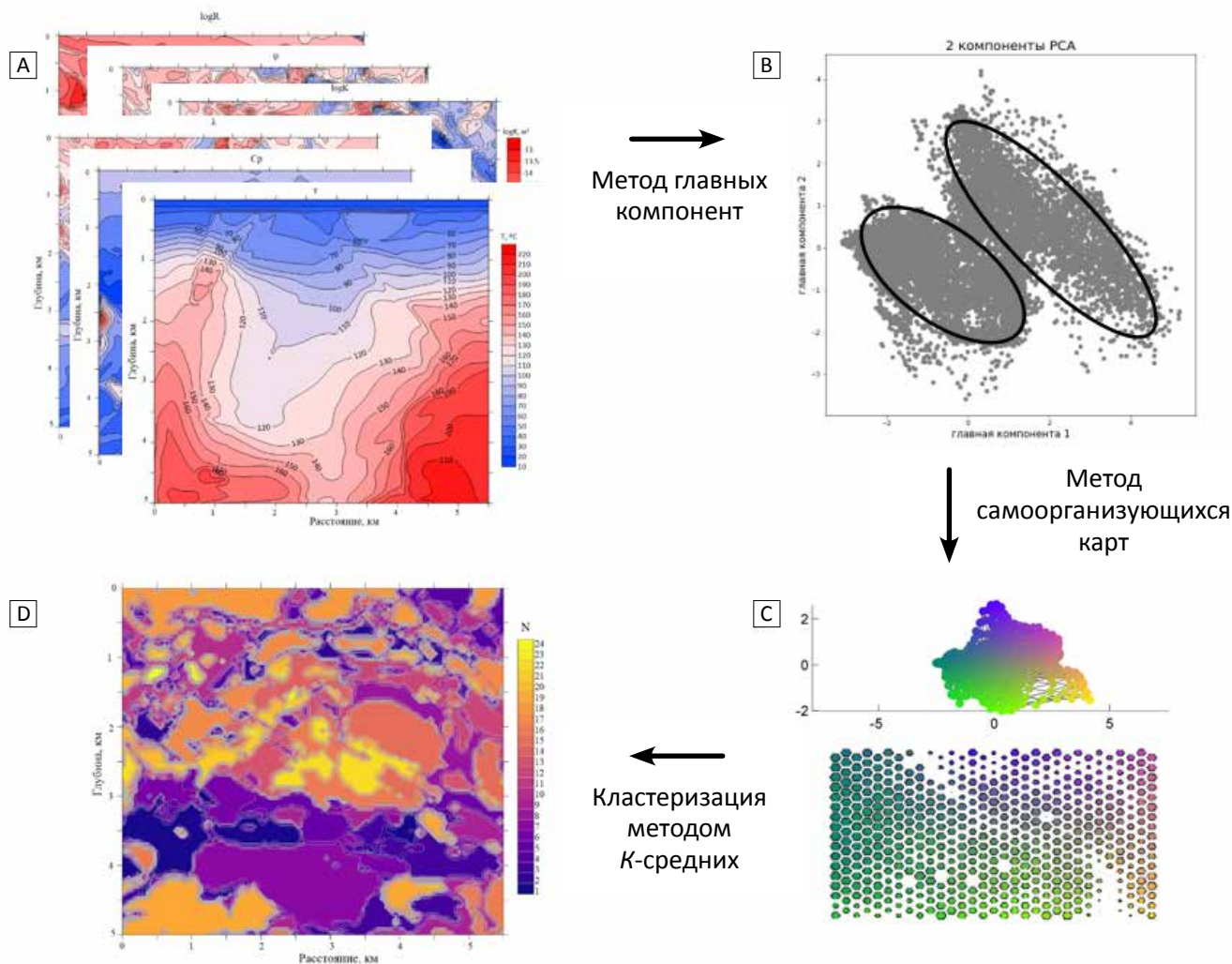
В первую очередь при анализе данных использовался метод главных компонент – один из основных способов уменьшения размерности данных при наименьшей потере количества информации. Нахождение главных компонент сводилось к вычислению собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы исходных данных. В данном случае данные преобразовывались в два вектора, с которыми производились дальнейшие операции для определения геометрии и размера будущей карты SOM. PCA определил размеры

будущей SOM-карты – отношение длина/ширина карты приблизительно соответствует отношению двух собственных векторов.

**2.2. Метод самоорганизующихся карт (SOM)**

Далее был применен метод самоорганизующихся карт – неконтролируемый метод машинного обучения, используемый для получения низкоразмерного представления набора данных более высокой размерности с сохранением топологической структуры данных. Идея метода сводилась к введению априорной информации о числе кластеров и обучению искусственной нейросети Кохонена выделению исследуемого пространстве земных недр пространственных участков с однотипными характеристиками.

Рис. 3. Общая блок-схема обработки информации  
Fig. 3. General block diagram of data processing



A — исходные разрезы параметров, B — результат выделения главных компонент, C — результат кластеризации с использованием метода самоорганизующихся карт (положение каждого компонента в системе осей-векторов и цветовое кодирование компонента), D — кластерный разрез в пространстве координат

A — the initial sections of the parameters, B — the result of the extraction of the principal components, C — result of clustering using self-organizing maps (position of each component in the system of axis-vectors and color-coding of the components), D — cluster section in coordinate space

Искусственная нейронная сеть Кохонена представляла собой двухслойную 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.

### 2.3. Кластеризация методом $K$ -средних

Для создания кластерного разреза использовался метод  $K$ -средних — итерационный метод поиска набора центроидов, наилучшим образом представляющего 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 SOM, полученных на предыдущем шаге, что значительно уменьшило разброс рассматриваемых параметров.

### 3. Оптимизация вычислительной схемы

Обработка информации в соответствии со схемой, показанной на рис. 3, осуществлялась с ис-

пользованием пакета программ KK Analysis, в котором перечисленные выше методы и процедуры реализованы и тестированы на многочисленных наборах геофизических данных [14].

#### 3.1. 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) [13]. Он вычислялся в ходе итерационного процесса кластеризации как отношение суммарной «внутренней» дисперсии (сумма расстояний между членами каждого кластера от центроида), к «внешней» дисперсии (расстояние между центроидами кластеров):

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

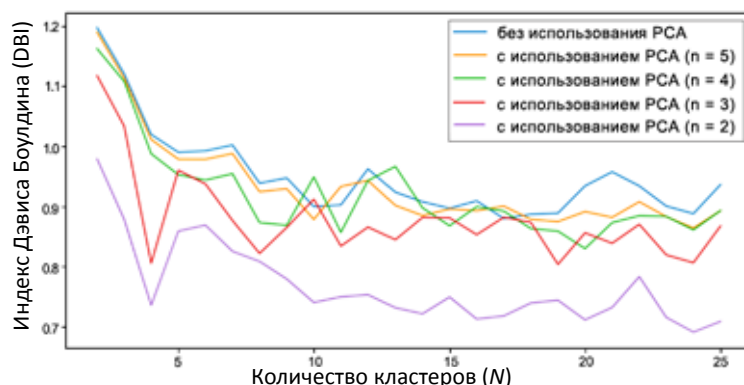
где  $s_i$  и  $s_j$  — показатели дисперсии в каждом кластере,  $c_i$  и  $c_j$  — соответствующие векторы центроидов кластеров,  $K$  — общее количество кластеров.

#### 3.2. Оценка влияния предварительного выделения главных компонент на скорость процесса кластеризации

Для оценки влияния предварительного выделения главных компонент на скорость сходимости процесса кластеризации исследования проводились в двух вариантах: с использованием PCA и без него. При этом количество главных компонент ( $n$ ) задавалось извне и в ходе экспериментов изменялось от 2 до 5. На рис. 4 показаны графики зависимости значений индекса DBI от количества кластеров ( $N$ ): с использованием PCA для предварительного выделения главных компонент и без него. В целом, при использовании PCA индекс DBI имел меньшее значение, чем без использования анализа главных компонент. При этом оптимальным (с точки зрения скорости сходимости процесса кластеризации) было выделение двух главных компонент, а мини-

**Рис. 4.** График зависимости значений индекса DBI от количества кластеров ( $N$ ): с использованием PCA (выделением различного количества главных компонент от 2 до 5) и без использования PCA

Fig. 4. Diagram of the dependence of DBI values on the number of clusters ( $N$ ): using PCA (with the extraction different number of principal components from 2 to 5) and without using PCA



мальное значение индекса DBI ( $= 0,7$ ) достигалось при количестве кластеров, равном 24.

### 3.3. 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 PCA 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 в п. 3.1 выше. Как и следовало ожидать, с ростом числа кластеров разрешение структуры растет и при  $N=24$  достигает своего наибольшего значения (рис. 5). При мень-

шем количестве априорно задаваемых кластеров разрешение структуры было бы недостаточным, а при большем приводило бы к неоправданным затратам времени.

Построенный кластерный разрез (рис. 5E) и соответствующие диапазоны значений всех рассмотренных параметров (рис. 6) по существу являются “паспортом” изучаемого участка недр, каждый кластер которого характеризуется своим набором диапазонов значений параметров. Такая широкая информационная база, в которую при наличии исходных геофизических данных могут быть добавлены, например, разрезы пористости и модулей упругости, удобна для последующего интерактивного выбора участка земных недр, перспективного с точки зрения оптимизации заданной функции

Рис. 5. Кластерные разрезы при числе кластеров  $N$ , равном 5 (A), 10 (B), 15 (C), 20 (D), 24 (E)

Fig. 5. Cluster sections for different numbers ( $N$ ) of clusters: 5 (A), 10 (B), 15 (C), 20 (D) and 24 (E)

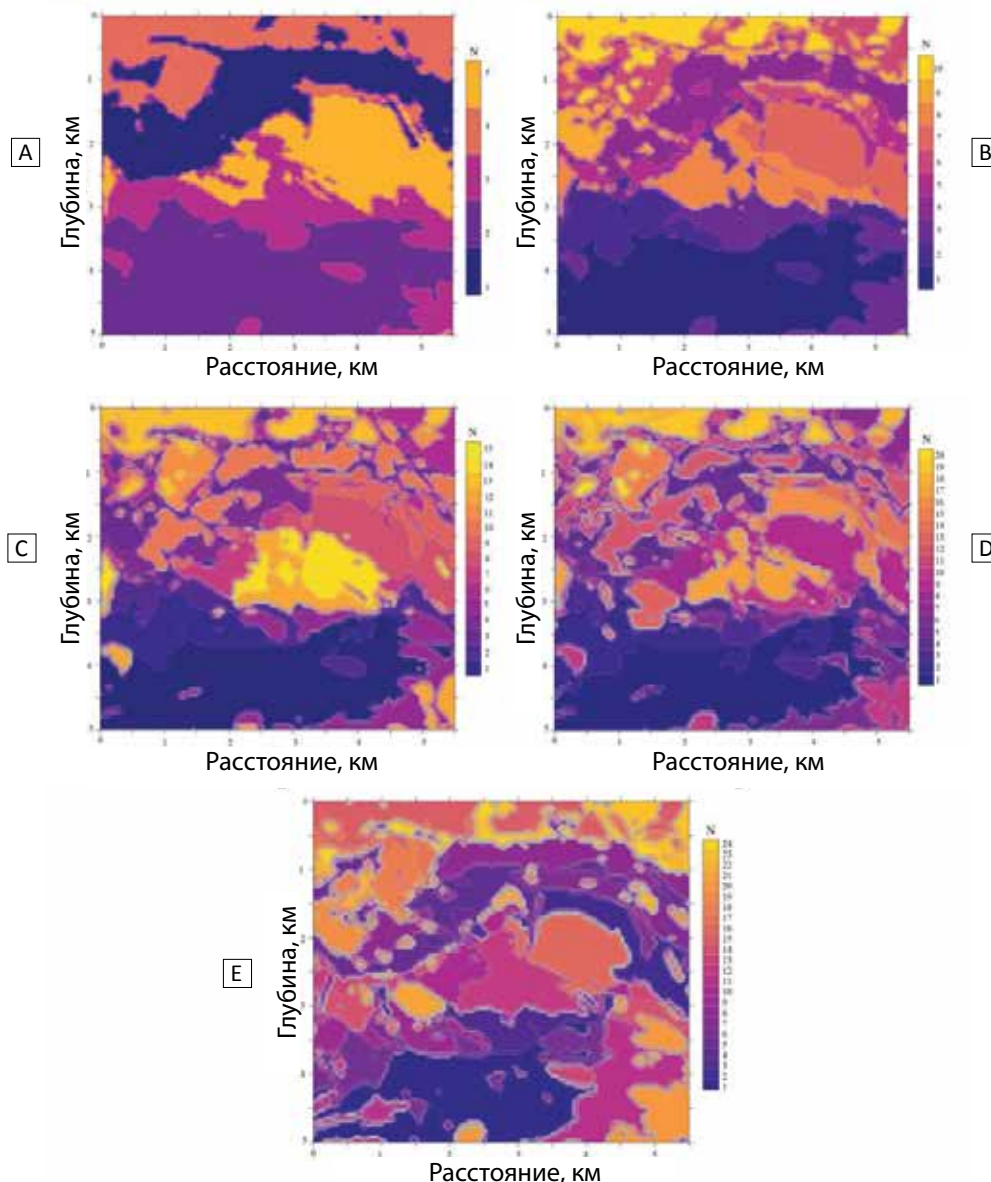
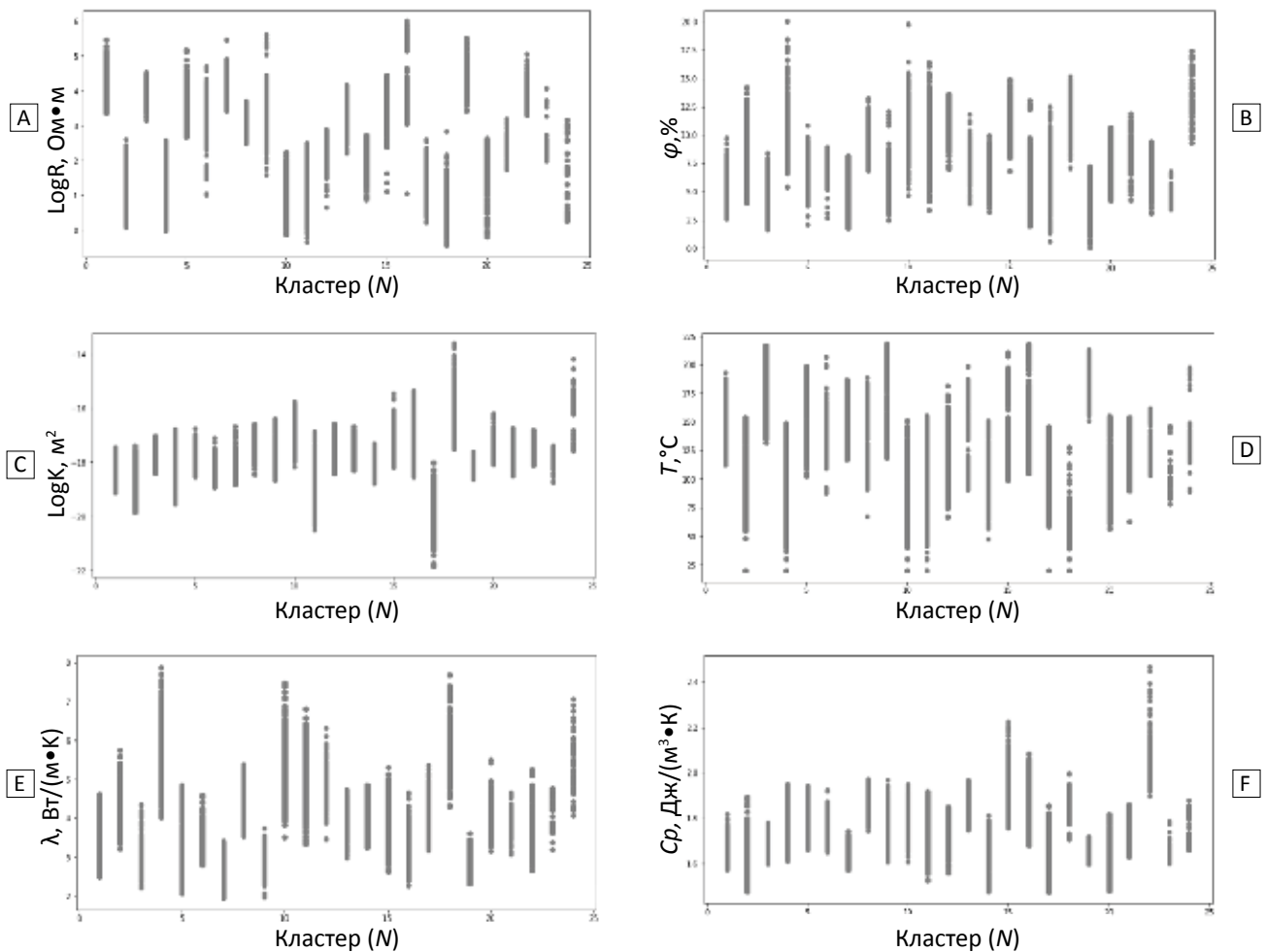


Рис. 6. Диапазоны значений рассматриваемых параметров в каждом кластере ( $N$ )Fig. 6. Ranges of values of the considered parameters in each cluster ( $N$ )

цели. При этом в каждом конкретном случае выбор параметров, по которым решается задача кластеризации, определяется извне в зависимости от имеющихся данных и поставленных целей.

#### 4. Выбор участков для бурения разведочных скважин

В качестве примера рассмотрим задачу выбора участка земных недр, перспективного с точки зрения проведения поисковых геолого-геофизических работ по выбору места для разведочного бурения геотермальной скважины. В этом случае упомянутыми целевыми параметрами могут быть температура ( $T$ ), проницаемость ( $\text{Log}K$ ) и удельная теплоемкость ( $C_p$ ) пород.

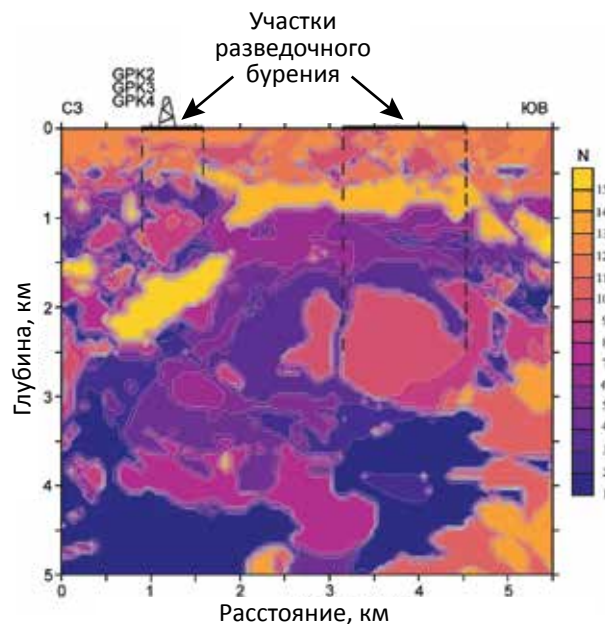
Как и в общем случае, рассмотренном выше, проводилось предварительное исследование, направленное на оптимизацию вычислительной схемы. В частности, было определено, что достаточно проводить кластеризацию с предварительным выделением двух главных векторов, а оптимальное количество кластеров равно 15.

На рис. 7, 8 показаны результаты кластеризации по указанным выше параметрам.

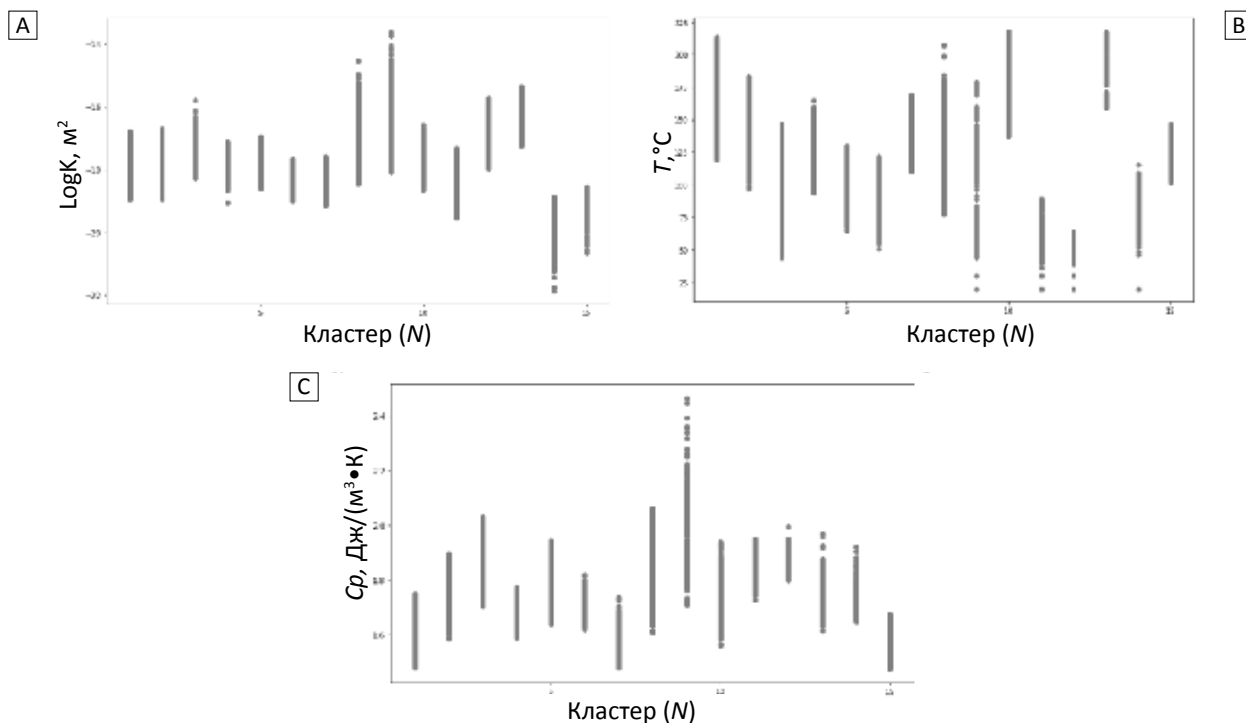
Для поиска участка, перспективного для бурения разведочной скважины, мы решали многокритериальную задачу оптимизации с достаточно мягкими ограничениями по температуре ( $T_{\text{ср}} > 100^\circ\text{C}$ ) и проницаемости ( $\text{abs}(\text{Log}K) < 17$ ) на данных о средних значениях параметров в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

По результатам оптимизации было определено, что заданным ограничениям удовлетворяют кластеры 8 и 9, которые характеризуются следующими средними значениями параметров: (8)  $T = 144,7^\circ\text{C}$ ,  $\text{Log}K = -16,9$ ,  $C_p = 1,8$  Дж/(м<sup>3</sup>·К); (9)  $T = 103,4^\circ\text{C}$ ,  $\text{Log}K = -16,8$ ,  $C_p = 2,0$  Дж/(м<sup>3</sup>·К). Первый расположен на глубинах 0,5–1,5 км в северо-западной части разреза и уже подтвержден бурением трех эксплуатационных скважин (ГРК2, ГРК3, ГРК4) а второй — на глубинах 2–3 км в юго-восточной части разреза. На рис. 7 показан соответствующий участок поверхности, с которого целесообразно проводить новое разведочное бурение.

**Рис. 7.** Кластерный разрез, построенный по данным температуры ( $T$ ), проницаемости ( $LogK$ ) и удельной теплоемкости ( $Cp$ ). GPK2-GPK4 — эксплуатационные скважины, которые используются в настоящее время для извлечения геотермальных ресурсов  
*Fig. 7.* Cluster section plotted from temperature ( $T$ ), permeability ( $LogK$ ) and specific heat capacity ( $Cp$ ) data. GPK2-GPK4 are production wells that are currently used to extract geothermal resources



**Рис. 8.** Диапазоны значений рассматриваемых параметров в каждом кластере ( $N$ )  
*Fig. 8.* Ranges of values of the considered parameters in each cluster ( $N$ )



**Заклучение**

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 ин-

формационная 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 геотермальным резервуаром. Второй расположен на глубинах 2–3 км в другой части разреза и может представлять несомненный интерес для проведения новых разведочных работ.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 020-17-00155).*

#### Список источников

1. Каплан С.А., Галуев В.И., Пиманова Н.Н., Малинина С.С. Комплексная интерпретация данных исследований на опорных профилях // *Геоинформатика*. – 2006. – № 3. – С. 38–46.
2. Никитин А.А., Каплан С.А., Галуев В.И., Малинина С.С. Определение физико-геометрических свойств земной коры по данным геофизического комплекса // *Геоинформатика*. – 2003. – № 2. – С. 29–38.
3. Спичак В.В. Современные методы комплексного анализа и инверсии геофизических данных // *Геология и геофизика*. – 2020. – Т. 61. – №3. – С. 341–357. DOI: 10.15372/GiG2019092.
4. Спичак В.В. Электромагнитная томография земных недр. – М.: Научный мир, 2019. – 376 с.
5. Спичак В.В., Безрук И.А., Гойдина А.Г. Построение трехмерных кластерных петрофизических моделей геологической среды по совокупности геофизических данных, измеренных на опорных профилях // *Разведка и охрана земных недр*. – 2015. – № 4. – С. 41–45.
6. Спичак В.В., Безрук И.А., Попова И.В. Построение глубинных кластерных петрофизических разрезов по геофизическим данным и прогноз нефтегазонасыщенности территорий // *Геофизика*. – 2008. – № 5. – С. 43–45.
7. Спичак В.В., Гойдина А.Г., Захарова О.К. Построение разрезов теплофизических свойств пород по данным электромагнитных зондирований и лабораторных измерений // *Геология и геофизика*. – 2023. – т. 64. – №3. – С. 431–446.
8. Спичак В.В., Захарова О.К. Оценка глубинных температур в геотермальной области Сульц-су-Форе, Франция, по данным магнитотеллурических зондирований // *Геофизика*. – 2011. – №1. – С. 54–60.
9. Спичак В.В., Захарова О.К. Построение разрезов пористости и водонасыщенности по данным электромагнитных зондирований и измерений в скважинах // *Геофизические исследования*. – 2023. – №1. – С. 44–60.
10. Спичак В.В., Захарова О.К. Электромагнитный геотермометр. М.: Научный мир, 2013. 170 с.
11. Спичак В.В., Захарова О.К. Электромагнитный прогноз проницаемости вне скважин // *Геофизические исследования*. – 2022. – Т. 23. – №2. – С.18–38. DOI: 10.21455/gr2022.2-2.
12. Черемисина Е.Н., Галуев В.И., Каплан С.А., Малинина С.С. Методика выделения опорных глубинных границ изменения физических свойств пород для решения задач интегрирования геоинформации при региональных геофизических исследованиях // *Геоинформатика*. – 2004. – № 1. – С. 50–53.
13. Davies D.L., Bouldin D.W. A Cluster Separation Measure // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1979. – Vol. PAMI-1. – No. 2. – P. 224–227. DOI: 10.1109/TPAMI.1979.4766909. S2CID 13254783.
14. Langer H., Falsaperla S., Hammer C. Advantages and Pitfalls of Pattern Recognition. Selected Cases in Geophysics. Amsterdam : Elsevier, 2020. 331 p.

#### References

1. Kaplan S.A., Galuev V.I., Pimanova N.N., Malinina S.S. Integrated processing and interpretation of research data on control geophysical profiles. *Geoformatika*. 2006;(3):38–46.
2. Nikitin A.A., Kaplan S.A., Galuev V.I., Malinina S.S. Opredelenie fiziko-geometricheskikh svoystv zemnoi kory po dannym geofizicheskogo kompleksa [Determination of the physical and geometric properties of the earth's crust according to the geophysical complex data]. *Geoformatika*. 2003;(2):29–38.
3. Spichak V.V. Modern methods for joint analysis and inversion of geophysical data. *Russian geology and geophysics*. 2020;61(3):341–357. DOI: 10.15372/RGG2019092.

4. Spichak V.V. Electromagnetic tomography of the earth's interior. Moscow: Scientific World; 2019. 376 p.
5. Spichak V.V., Bezruk I.A., Goydina A.G. Construction of the three-dimensional cluster petrophysical models of geological medium based on the geophysical data collected along reference profiles. *Prospect and protection of mineral resources*. 2015;(4):41–45.
6. Spichak V.V., Bezruk I.A., Popova I.V. Deep cluster petrophysical sections construction using geophysical data for assessment of hydrocarbon potential. *Journal of geophysics*. 2008;(2):29–38.
7. Spichak V.V., Goidina A.G., Zakharova O.K. Postroenie razrezov teplofizicheskikh svoystv porod po dannym ehlektromagnitnykh zondirovaniy i laboratornykh izmereniy [Construction of sections of rocks thermophysical properties according to electromagnetic sounding and laboratory measurements]. *Russian geology and geophysics*. 2023;(64):443–446.
8. Spichak V.V., Zakharova O.K. Assessment of deep temperature in the geothermal area of Soultz-sous-Forêt, France, according to magnetotelluric soundings. *Journal of geophysics*. 2011;(1):54–60.
9. Spichak V.V., Zakharova O.K. Postroenie razrezov poristosti i vodonasyshchennosti po dannym ehlektromagnitnykh zondirovaniy i izmereniy v skvazhinakh [Construction of sections of porosity and water saturation according to the data of electromagnetic soundings and measurements in wells]. *Geophysical research*. 2023;(1):44–60.
10. Spichak V.V., Zakharova O.K. Ehlektromagnitnyi geotermometr [Electromagnetic geothermometer]. Moscow: Nauchnyi mir; 2013. 170 p.
11. Spichak V.V., Zakharova O.K. Electromagnetic permeability forecast beyond boreholes. *Geophysical research*. 2022;23(2):18–38. DOI: 10.21455/gr2022.2-2.
12. Cheremisina E.N., Galuev V.I., Kaplan S.A., Malinina S.S. Metodika vydeleniya opornykh glubinykh granits izmeneniya fizicheskikh svoystv porod dlya resheniya zadach integrirovaniya geoinformatsii pri regional'nykh geofizicheskikh issledovaniyakh [A technique for identifying reference deep boundaries of changes in the physical properties of rocks for solving the problems of integrating geoinformation in regional geophysical studies]. *Geoinformatika*. 2004;(1):50–53.
13. Davies D.L., Bouldin D.W. A Cluster Separation Measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1979;PAMI-1(2):224–227. DOI: 10.1109/TPAMI.1979.4766909. S2CID 13254783.
14. Langer H., Falsaperla S., Hammer C. Advantages and Pitfalls of Pattern Recognition. Selected Cases in Geophysics. Amsterdam: Elsevier; 2020. 331 p.

Статья поступила в редакцию 16.12.2022, одобрена после рецензирования 20.03.2023, принята к публикации 01.04.2023.  
The article was submitted 16.12.2022; approved after reviewing 20.03.2023; accepted for publication 01.04.2023.

### Информация об авторах

#### Спичак Вячеслав Валентинович

Доктор физико-математических наук, академик РАН и НАН, заведующий Лабораторией методологии интерпретации электромагнитных данных

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
108840 Троицк, а/я 30, ЦГЭМИ ИФЗ РАН  
e-mail: v.spichak@mail.ru

#### Ненюкова Алёна Игоревна

Студентка

Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе  
117997 Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23  
e-mail: nenjukovaai@mail.ru

### Information about authors

#### Viacheslav V. Spichak

Doctor of Sciences, Member of Russian Academy of Natural Sciences and New York Academy of Sciences, Head of the Lab Methodology of the EM data interpretation

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS  
GEMRC, POB 30, Troitsk, 108840, Russia  
e-mail: v.spichak@mail.ru

#### Alena I. Nenyukova

Student

Sergo Ordzhonikidze Russian State University  
for Geological Prospecting  
23, Miklouho-Maclay St., Moscow, 117997, Russia  
e-mail: nenjukovaai@mail.ru