

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ БАССЕЙНОВ

Оригинальная статья

УДК 550.8.01

EDN: GVUENK

Новый метод анализа естественной трещиноватости пород, основанный на поскважинной и поинтервальной кластеризации

А.В. Бондарев¹, К.О. Ровнер¹, Л.И. Бондарева² ✉

1 – ООО «Интегрированные разработки для моделирования», Россия, 117418, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 25а

2 – Институт проблем нефти и газа РАН, Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3

Аннотация. *Актуальность.* Для моделирования трещиноватой среды необходима информация о трещинных системах их направлений (азимуты и углы падения), концентрации направлений, интенсивности (плотности) трещин, раскрытости и проницаемости, поэтому авторы в данной работе сконцентрировались на параметрах, которые определяют геометрическое положение и направление естественных трещин. *Цель работы.* Внедрение нового метода анализа естественной трещиноватости, основанного на поскважинной и поинтервальной кластеризации, для повышения точности прогнозирования фильтрационно-емкостных свойств продуктивных пластов. *Материалы и методы.* Использовались материалы естественной трещиноватости пород по Юрубчено-Тохомскому месторождению на основе кластеризации трещин в программном обеспечении tNavigator. *Результаты.* Азимуты и углы падения трещин определяются по интерпретации микроимиджеров. Результатом интерпретации являются скважинные объекты, имеющие три обязательных параметра: глубина по стволу скважины, азимут падения, угол падения. В работе показано, что естественные трещины формировались в разных условиях, под действием различных тектонических напряжений и, следовательно, имеют различные элементы залегания, они относятся к разным системам трещин, имеющим разные направления, и их необходимо моделировать раздельно с разными параметрами. Кластеризация позволяет решить поставленную задачу. Было выполнено сравнение методов кластеризации. *Выводы.* Предложенные методы кластеризации элементов залегания имеют различную область практического использования. Автоматическая кластеризация трещин по направлениям позволит существенно сократить время работы геолога над геологической моделью месторождения. На больших глубинах естественная трещиноватость является ключевым фактором, определяющим проницаемость горных пород.

Ключевые слова: трещиноватость, кластеризация, геологическое моделирование, сейсмические атрибуты, месторождения нефти и газа

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИПНГ РАН (тема № 125021302095-2).

✉ Бондарева Лиана Ильясовна, liana_bondareva@ipng.ru

© Бондарев А.В., Ровнер К.О., Бондарева Л.И., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Бондарев А.В., Ровнер К.О., Бондарева Л.И. Новый метод анализа естественной трещиноватости пород, основанный на поскважинной и поинтервальной кластеризации // Актуальные проблемы нефти и газа. 2025. Т. 16, № 4. С. 520–534. EDN: GVUENK

Введение

В процессе трехмерного моделирования трещиноватых и трещинно-поровых коллекторов нефтегазовых месторождений, перед геологами встает задача анализа и моделирования естественной трещиноватости. Для моделирования трещиноватой среды необходима информация о трещинных системах: их направлений (азимуты и углы падения), концентрации направлений, интенсивности (плотности) трещин, раскрытости и проницаемости. Раскрытость (апертура), проницаемость, сжимаемость трещин, несомненно, – важные параметры для успешного моделирования трещиноватых коллекторов, однако эти параметры вторичные. Указанные параметры напрямую зависят от генезиса того или иного кластера трещин, но не наоборот – по этим параметрам кластеризация трещин обычно не выполняется (хотя они и могут быть использованы в качестве весов). Поэтому авторы в данной работе сконцентрировались на первых двух параметрах, которые определяют геометрическое положение и направление естественных трещин.

Кластерный анализ представляет собой эффективный подход к обработке геологических данных [1–3]. Далеко не всегда удастся разделить системы трещин сразу во время интерпретации микроимиджеров, и даже когда это возможно – всегда возможны ошибки интерпретаторов. В связи с тем, что под воздействием одинаковых или похожих по направлениям тектонических напряжений новые трещины обычно не образуются, а лишь активируются уже существующие

трещины (критически напряженные трещины, т. е. те, которые расположены оптимальным образом к направлениям тектонических напряжений [4]), количество таких кластеров трещин обычно ограничено и не превышает пяти.

В нефтегазовой отрасли кластеризация трещинных коллекторов по параметрам направлена на идентификацию трещинных систем путем определения их азимутальных и угловых характеристик. Это позволяет установить их количество, генетический тип и общую степень нарушенности массива пород¹.

Для того чтобы отдельно моделировать каждый кластер трещин, необходимо сначала эти кластеры выделить по исходной информации, что, как было указано выше, далеко не всегда удастся сделать во время интерпретации. Можно на основе исходных данных выделять кластеры трещин вручную, анализируя «стереонеты» и «розы направлений», назначая каждой трещине свой кластер, но в некоторых месторождениях количество трещин измеряется сотнями на продуктивный интервал, и тысячами – на скважину. Поэтому алгоритмы автоматической кластеризации трещин по направлениям – актуальные механизмы, которые позволяют сэкономить большое количество времени геолога.

¹ Епиванцев О.Г., Плетенчук Н.С.

Трещиноватость горных пород. Основы теории и методы изучения: Методические рекомендации. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2008. 41 с.

Целью работы является внедрение нового метода анализа естественной трещиноватости, основанного на поскважинной и поинтервальной кластеризации, для повышения точности прогнозирования фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) продуктивных пластов.

Материалы и методы

Использовались комплексные материалы естественной трещиноватости пород по Юрубчено-Тохомскому месторождению на основе кластеризации трещин в моделях DFN (Discrete Fracture Network) в программном обеспечении tNavigator (разработка Rock Flow Dynamics).

Результаты и обсуждение

Существует большое количество различных алгоритмов кластеризации точечных данных [5, 6], особенностью работы которых с трещинными данными является то, что кластеризация проводится в особой угловой метрике, которая учитывает особенности углов. Например, трещина с такими элементами залегания, как угол 89° и азимут 10° , очень близка по залеганию к трещине с углом 89° и азимутом 190° , хотя при отображении их на «стереонете» они окажутся на противоположных сторонах. По тем же самым причинам особенностей угловой метрики, при уменьшении угла падения азимут начинает влиять все меньше и меньше, сжимаясь в краевой ситуации в горизонтальные трещины, у которых отсутствуют понятия азимута падения.

Само по себе использование особой угловой метрики в задачах кластеризации не новое [7–9], однако только

лишь использование угловой метрики не дает приемлемых результатов, если применять ее без учета «дрифта» параметров по латерали и вертикали. Прямая кластеризация подразумевает стационарность распределения направлений трещин, что зачастую неверно. Использование статистических методов в нестационарных средах приводит к заведомо неверным результатам [10, 11] и направления трещин тут не исключение.

К примеру, на рис. 1 показаны данные трещиноватости по Юрубчено-Тохомскому месторождению.

Задачей спектральной кластеризации является выявление естественной группировки – разделение набора данных на подмножества (кластеры). Простая кластеризация спектральным методом [12] успешно выделяет эти два кластера (см. рис. 1а). Однако границы кластеров прямые, и на общем стереонете легко провести линию, которая однозначно отделяет один кластер от другого. Рассматривая отдельно одну из скважин, становится видно, что центры кластеров сместились, и часть трещин попала не в правильный, а другой кластер (см. рис. 1б), особенно это видно на группе трещин с азимутами падения около 30° и 210° . Трещины с таким углом падения попали в красный кластер, хотя конкретно по этой скважине видно, что они должны быть в зеленом кластере.

Линия общей кластеризации разъединила локальное облако на данной скважине таким образом, что кластеры выделены неправильно, а произошло это из-за дрейфа центральной точки кластера в этой скважине.

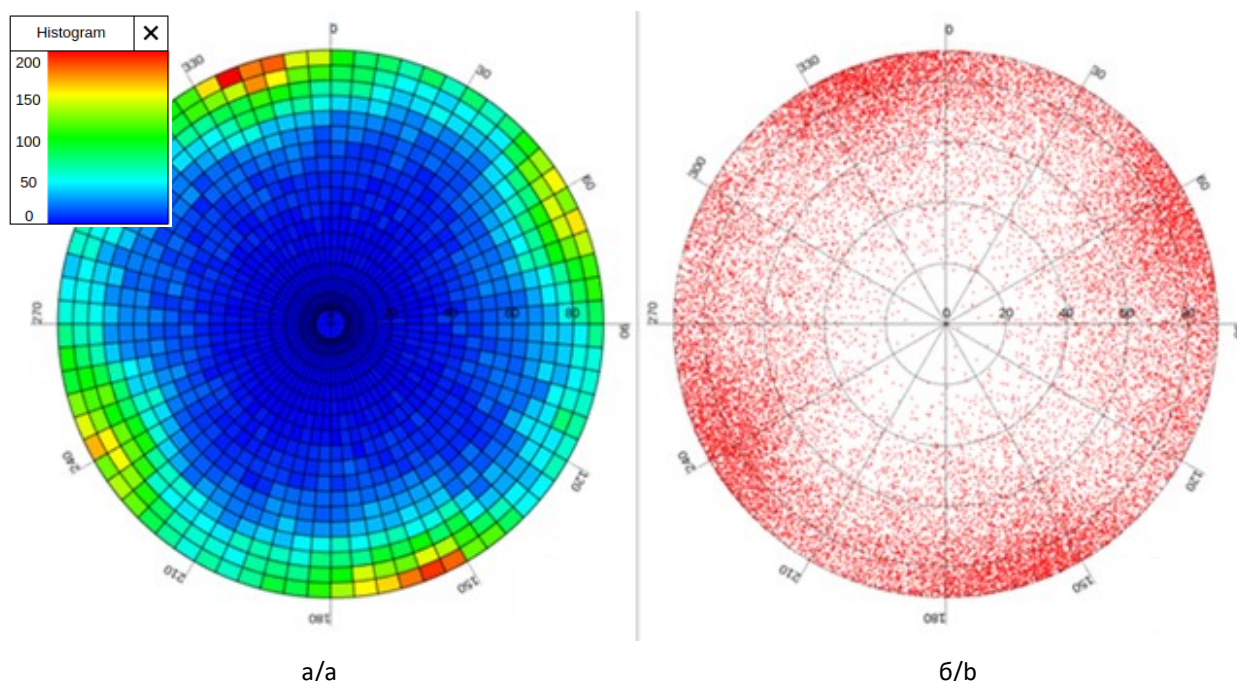


Рис. 1. График распределения параметров элементов залегания естественных трещин:
а – гистограмма стереонета исходных данных; б – исходные точки для кластеризации

Fig. 1. Graph of distribution of the parameters of crack occurrence elements:
a – histogram of the stereonet of the original data; b – initial points for clustering

Источник: на основе [10], Дегтерёв А.Ю., Бондарев А.В. Анализ эффективности различных оптимизационных алгоритмов в задачах геологического моделирования// Геомодель 2022: Сб. материалов 24-й научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. М.: EAGE Геомодель, 2022. С. 158–161

Source: based on [10], Degterev A.Yu., Bondarev A.V. Analysis of the efficiency of various optimization algorithms in geological modeling tasks. In: *Geomodel 2022: Proceedings of the 24th Scientific and Practical Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development*. Moscow: EAGE Geomodel, 2022. P. 158–161. (In Russ.)

Менее выразительно, но такая же проблема наблюдается на этой скважине в районе азимута 120° (и 300° соответственно). Несколько трещин попали в зеленый кластер, хотя они значительно ближе к красному.

Аналогичные проблемы наблюдаются во многих других скважинах этого объекта исследований, но все они вызваны одной и той же причиной – дрейфом центров кластеров между скважинами, так называемой латеральной нестационарностью. Помимо дрейфа центров кластеров (смещение угла и азимута) существует еще дрейф угловой концентрации – изменение разброса точек на стереонете относительно центра распределения. Простая кластеризация также никак это не учитывает (рис. 2).

Предлагаемое решение латеральной нестационарности направления трещин

Для того чтобы учесть нестационарность элементов залегания трещин и дрейф центров кластеров между скважинами, нами был использован метод отдельной кластеризации по скважинам. Первым шагом выполняется обычная кластеризация по всем имеющимся данным, как обычно, запоминаются центральные точки этих глобальных кластеров. Вторым шагом кластеризация выполняется отдельно по каждой скважине, независимо выделяются кластеры в каждой скважине, их максимальное число не может превышать количество глобальных кластеров, но может быть меньше.

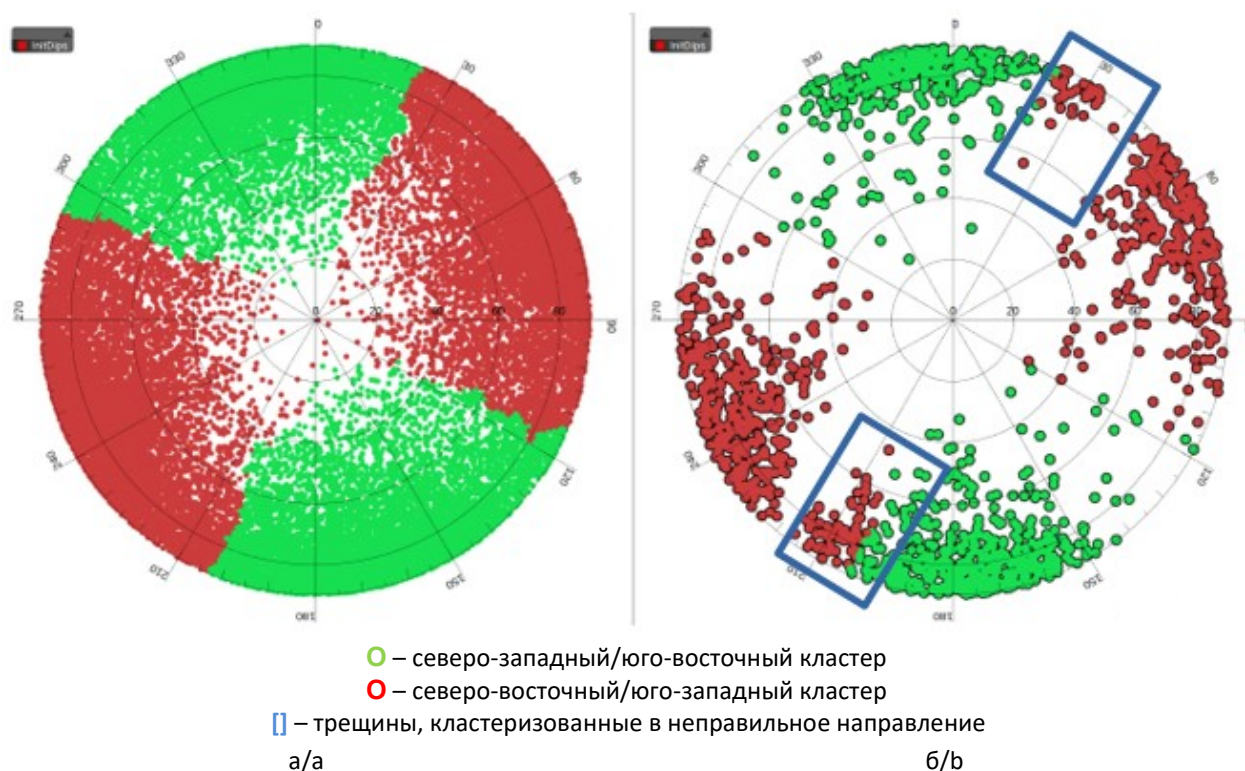


Рис. 2. Результаты распределения трещин по кластерам:
 а – гистограмма прямой кластеризации по всем скважинам;
 б – гистограмма прямой кластеризации в одной из скважин

Fig. 2. Results of fracture distribution by clusters:
 а – histogram of direct clustering for all wells;
 б – histogram of direct clustering in one of the wells

Источник: на основе [10], Дегтерёв А.Ю., Бондарев А.В. Анализ эффективности различных оптимизационных алгоритмов в задачах геологического моделирования// Геомодель 2022: Сб. материалов 24-й научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. М.: EAGE Геомодель, 2022. С. 158–161

Source: based on [10], Degterev A.Yu., Bondarev A.V. Analysis of the efficiency of various optimization algorithms in geological modeling tasks. In: *Geomodel 2022: Proceedings of the 24th Scientific and Practical Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development*. Moscow: EAGE Geomodel, 2022. P. 158–161. (In Russ.)

После этого центры этих локальных/скважинных кластеров сравниваются с центрами глобальных кластеров и все точки локального кластера приписываются к ближайшему глобальному кластеру. Это позволяет учесть смещение кластеров между скважинами, но при этом сохранить соответствие направлений кластеров между скважинами – обеспечить плавное смещение параметров кластеров.

Помимо назначения индекса кластера каждой трещине, автоматическая поскважинная кластеризация еще и определяет параметры распределения каждого кластера в каждой скважине, которые в дальнейшем можно использовать для построения карт или 3D-моделирования среднего угла падения, среднего азимута и угловой концентрации.

Псевдокод предлагаемого решения латеральной нестационарности направления трещин следующий:

```

(global_labels, global_centroids) ← CLUSTER(data, K_global)
wells ← UNIQUE(well_id(data))
for each w in wells do
    local_data ← SELECT(data, well_id = w)
    (local_labels, local_centroids) ← CLUSTER(local_data, K_global)
    for each c_local in local_centroids do
        best ← argmin_c_global DISTANCE(c_local, global_centroids[c_global])
        MAP_LOCAL_TO_GLOBAL(w, c_local, best)
    end for
end for

```

На рис. 3 изображен результат такой поскважинной кластеризации на тех же

данных. Стереонет по всем данным показывает некоторое перемешивание кластеров.

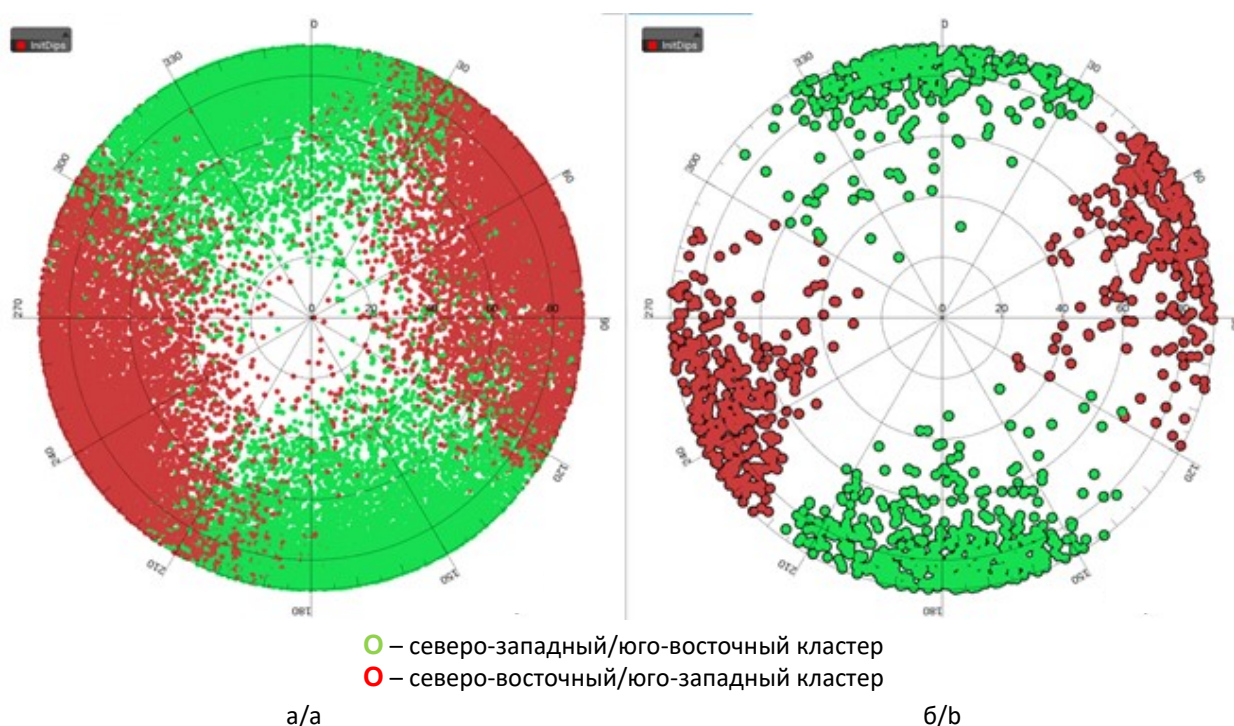


Рис. 3. Результаты распределения трещин по кластерам:
а – гистограмма поскважинной кластеризации;
б – гистограмма кластеризации в одной из скважин

Fig. 3. Results of fracture distribution by clusters:
a – well-by-well clustering histogram;
b – clustering histogram in one of the wells

Источник: на основе [10], Дегтерёв А.Ю., Бондарев А.В. Анализ эффективности различных оптимизационных алгоритмов в задачах геологического моделирования // Геомодель 2022: Сб. материалов 24-й научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. М.: ЕАГЕ Геомодель, 2022. С. 158–161

Source based on [10], Degterev A.Yu., Bondarev A.V. Analysis of the efficiency of various optimization algorithms in geological modeling tasks. In: *Geomodel 2022: Proceedings of the 24th Scientific and Practical Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development*. Moscow: EAGE Geomodel, 2022. P. 158–161. (In Russ.)

Это обусловлено как раз дрифтом центров кластеров между скважинами, но среднее положение выделенных кластеров остается относительно стабильным. На проверочной скважине видно, что кластеризация прошла успешнее, кластеры разделились лучше (см. рис. 3б).

***Предлагаемое решение
вертикальной нестационарности
направления трещин***

В геостатистических методах интерполяции существуют различные методики борьбы с вертикальной нестационарностью: использование вертикальных трендов геолого-статистических разрезов (ГСР), вложенные вариограммы и, в том числе, разделение моделируемой области на отдельные пласты. Помимо раздельного моделирования по пластам, иногда также прибегают к разделению на сегменты, литотипы, разломные блоки или дроблению любым другим способом, разделяя область моделирования на дискретные кластеры – все ради того, чтобы добиться стационарности в пределах одного дискретного кластера. В случае пластового типа природного резервуара этот способ подходит и для моделирования трещин. В таком случае достаточно кластеризовать и моделировать трещины отдельно по каждому пласту, полагая, что благодаря схожим седиментологическим обстановкам в пласте сформировались породы со схожими геомеханическими свойствами, а значит, в пределах одного пласта стационарность распределения трещин сохраняется. Однако, это сомнительно для моделирования массивных и пластово-массивных залежей, когда выделение отдельных пластов или дискретных кластеров может только исказить качество модели.

Кроме того, разделив исследуемую зону на подзоны и проводя анализ независимо, мы значительно ограничиваем себя в количестве точек данных, на котором будет проводиться анализ. Это может привести к тому, что в некоторых выделенных кластерах будет всего по несколько точек данных, которые естественно будут удовлетворять условиям стационарности.

В целом, учет вертикального (вдоль ствола скважины) дрефта центров кластеров является более сложной задачей, но выполняется похожим образом, как в случае горизонтальной составляющей нестационарности. После того как проведена общая кластеризация, запускается еще одна – поинтервальная. Интервал имеет заданную длину (предполагаемая длина проявления локальных особенностей) и на каждом шаге точки смещаются на некоторую глубину (обычно примерно $\frac{1}{4}$ длины интервала или меньше) с перекрытием, по аналогу скользящего окна. Центральные точки кластеров, выделенные на каждом интервале, записываются в новый набор элементов залегания. После прохождения всех интервалов по всем скважинам, этот полученный набор еще раз кластеризуется, чтобы выявить кластеры уже целой скважины и объединить близкие друг к другу кластеры в один (рис. 4, 5).

В результате такой интервальной кластеризации кластеры могут смещаться по вертикали MD (Measured Depth – измеренная глубина скважины). Как видно из приведенных стереонетов на диаграмме скважин, такое смещение позволяет еще более качественно разделить кластеры трещин.

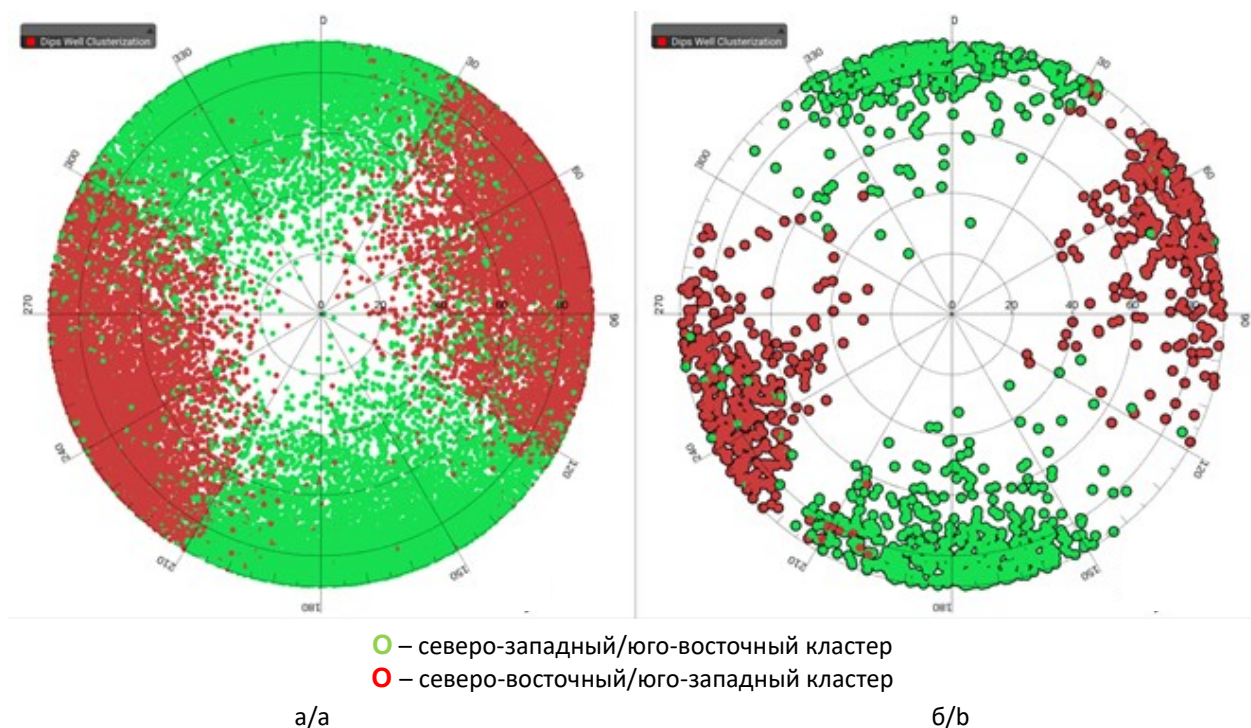


Рис. 4. Результаты распределения трещин по кластерам:
а – гистограммы поинтервальной кластеризации;
б – гистограммы кластеризации в одной из скважин

Fig. 4. Results of fracture distribution by clusters:
a – interval clustering histograms;
b – clustering histograms in one of the wells

Источники: на основе [10], Дегтерёв А.Ю., Бондарев А.В. Анализ эффективности различных оптимизационных алгоритмов в задачах геологического моделирования // Геомодель 2022: Сб. материалов 24-й научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. М.: ЕАГЕ Геомодель, 2022. С. 158–161

Source based on [10], Degterev A.Yu., Bondarev A.V. Analysis of the efficiency of various optimization algorithms in geological modeling tasks. In: *Geomodel 2022: Proceedings of the 24th Scientific and Practical Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development*. Moscow: EAGE Geomodel, 2022. P. 158–161. (In Russ.)

Для оценки качества кластеризации можно использовать критерий Дэвиса–Болдуина, однако этот критерий следует использовать только для оценки качества методов кластеризации между собой (DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) [13, 14, 15], KPSO (K-means Particle Swarm Optimization) [8], Spectral [12]), но не между предложенными способами поскважинной/поинтервальной кластеризации. Это связано с тем, что индекс критерия Дэвиса–

Болдуина оценивает только среднее расстояние до кластера, а по скважинам, как и по интервалам, такое расстояние в среднем по всем точкам будет гарантированно больше сквозной общей кластеризации. Реальной оценкой качества может быть серия гидродинамических моделей месторождения, каждая из которых была построена с использованием различных способов кластеризации и дискретной сети трещин DFN (Discrete Fracture Network), EDFM (Embedded Discrete Fracture Model).

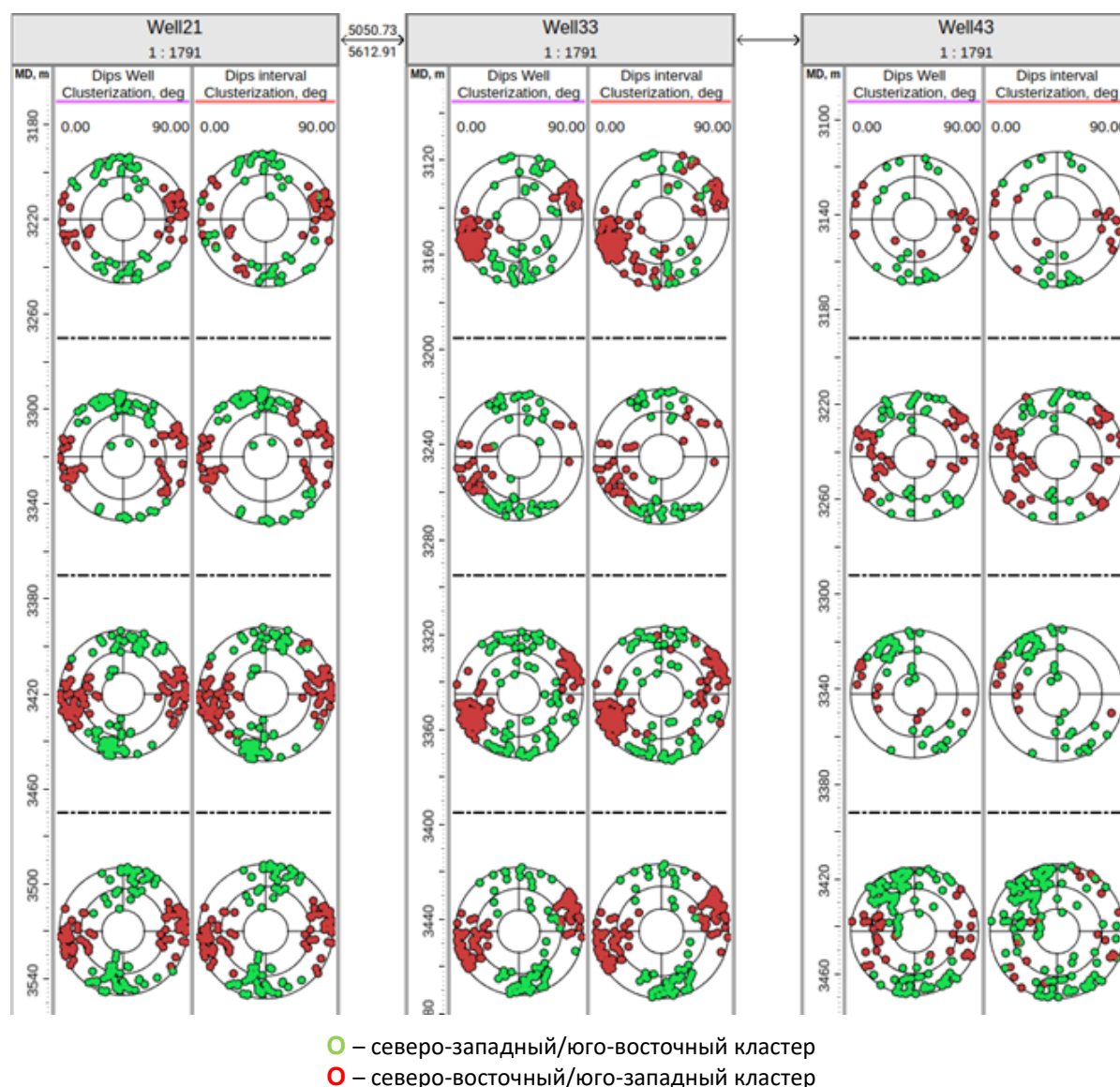


Рис. 5. Гистограммы распределения трещин по кластерам при поинтервальной кластеризации по трем скважинам

Fig. 5. Histograms of fracture distribution by clusters using interval clustering for three wells

Источник: на основе [10], Дегтерёв А.Ю., Бондарев А.В. Анализ эффективности различных оптимизационных алгоритмов в задачах геологического моделирования // Геомодель 2022: Сб. материалов 24-й научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. М.: EAGE Геомодель, 2022. С. 158–161

Source based on [10], Degterev A.Yu., Bondarev A.V. Analysis of the efficiency of various optimization algorithms in geological modeling tasks. In: *Geomodel 2022: Proceedings of the 24th Scientific and Practical Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development*. Moscow: EAGE Geomodel, 2022. P. 158–161. (In Russ.)

Стоит отметить, что если кластеризация по скважинам практически всегда дает хороший результат, то кластеризация по интервалам более чувствительна к настройкам и иногда находит слишком много кластеров (хотя их максимальное число

можно ограничить или явно указать желаемое число кластеров). Кроме того, за счет многократной кластеризации одних и тех же данных возрастают требования к вычислительной мощности программного комплекса.

Но самое главное ограничение этого подхода состоит в том, что для успешной поинтервальной кластеризации нужно, чтобы в каждый интервал попадало достаточное количество исходных точек. Трещин должно быть достаточное количество для алгоритма, и в случае редкой сети трещин, приходится выбирать большой размер интервалов и крупный шаг, что уменьшает значимость этого метода. Более универсальным и менее требовательным к исходным данным является поскважинная кластеризация, и в большинстве случаев стоит рекомендовать именно ее.

В рамках исследования также производилось сравнение методов кластеризации, где наилучшие результаты во всех вариантах (простой, поскважинный, поинтервальный) получены спектральным методом кластеризации. Метод KPSO (K-средних с оптимизацией роением частиц) плохо подходит под задачи кластеризации трещин на стереонете, так как исходит из предположения, что кластеры примерно равны между собой по размерам, что почти никогда не встречается в реальных геологических ситуациях. Метод DBSCAN давал более приемлемые результаты, но все же, на наш взгляд, спектральная кластеризация отработала лучше всего. Тем не менее, на других исходных данных другой метод может дать более приемлемые результаты.

Заключение

Предложенные методы кластеризации элементов залегания имеют различную область практического использования,

требовательны к плотности входных данных (поскважинная в меньшей степени) и требуют проверки качества выполнения со стороны человеческого фактора. Но когда речь идет о крупных месторождениях в трещинных или трещинно-поровых коллекторах, автоматическая кластеризация может сэкономить большое количество рабочего времени интерпретатора, дать первое приближение для дальнейшей работы или служить проверочным материалом. Выделенные кластеры могут быть в дальнейшем объединены или кластеризованы повторно, в зависимости от поставленных задач и желаемого результата. Помимо самих кластеров, благодаря методу максимального правдоподобия, геолог получает для дальнейшей работы еще и параметры распределения этих кластеров. Причем в случае поскважинной кластеризации – в виде значения на скважину, а в случае поинтервальной кластеризации – в виде значения на интервал (фактически кривую геофизических исследований скважин). Эти параметры распределения (средний угол и азимут падения, угловая концентрация трещин) могут быть использованы в дальнейшем для построения карт или 3D моделирования угловой концентрации, средних углов и азимутов.

На больших глубинах естественная трещиноватость является ключевым фактором, определяющим проницаемость горных пород. Образование трещин создает эффективные пути миграции флюидов, таких как вода, нефть и газ, тем самым увеличивая их пропускную способность.

Вклад авторов

А.В. Бондарев – концептуализация, методология, создание черновика рукописи.

К.О. Ровнер – формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи.

Л.И. Бондарева – визуализация, верификация данных, создание рукописи и ее редактирование.

Все авторы утвердили окончательную версию статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список источников

1. Абдрахманов М.И., Лапин С.Э., Шнайдер И.В. Применение алгоритмов кластеризации для экспресс-анализа сейсмических данных // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 6. С. 27–44. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-27-44>
2. Войтеховский Ю.Л. Кластерный анализ в геологии: метрики и меры // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2019. № 5(293). С. 46–47. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-5-46-47>
3. Двоерядкина Н.Н., Чалкина Н.А. Кластерный анализ как инструмент обработки геологических данных // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2010. Вып. 49. С. 22–29. EDN: PZMJQH
4. Zoback M.D. Reservoir Geomechanics. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press, 2007. 449 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511586477>
5. Li Y., Wang Q., Chen J. et al. K-means algorithm based on particle swarm optimization for the identification of rock discontinuity sets // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2014. Vol. 48, No. 1. P. 375–385. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0569-x>
6. Xu Y., Wu J., Zhao G. et al. II-LA-KM: Improved initialization of a learning augmented clustering algorithm for effective rock discontinuity grouping // Mathematics. 2024. Vol. 12, No. 20. P. 3195. <https://doi.org/10.3390/math12203195>
7. Cui X., Yan E. A clustering algorithm based on differential evolution for the identification of rock discontinuity sets // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020. Vol. 126. P. 104181. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104181>
8. Ye F., Chen C.-Y. Alternative KPSO-clustering algorithm // Tamkang Journal of Science and Engineering. 2005. Vol. 8, No. 2. P. 165–174. <https://doi.org/10.6180/jase.2005.8.2.09>
9. Shanley R.J., Mahtab M.A. Delineation and analysis of clusters in orientation data // Journal of the International Association for Mathematical Geology. 1976. Vol. 8, No. 1. P. 9–23. <https://doi.org/10.1007/BF01039681>
10. Degterev A.Yu. The hypothesis of stationarity in geostatistics and its influence on the reliability of the created models [Гипотеза стационарности в геостатистике и ее влияние на достоверность создаваемых моделей] Geomodel 2021 – 23th Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development, Gelendzhik, Russia, 6–10 September 2021. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202157092>
11. Degterev A., Topchii M., Bondarev A. Improvement possibilities for the open geological model of the Groningen field // SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and

Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 24–26 January 2023. Paper SPE-212591-MS. <https://doi.org/10.2118/212591-MS>

12. *Jimenez-Rodriguez R., Sitar N.* A spectral method for clustering of rock discontinuity sets // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2006. Vol. 43, No. 7. P. 1052–1061. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.02.003>

13. *Li C., Zhou J., Du K., Tao M.* Enhanced discontinuity characterization in hard rock pillars using point cloud completion and DBSCAN clustering // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2025. Vol. 186. P. 106005. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.106005>

14. *Виллиамс М.В., Кузяков О.Н.* Сравнительный анализ методов идентификации кластеров Getis-Ord Gi* и DBSCAN при разведке полезных ископаемых // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2025. № 1(168). С. 35–41. EDN: GFGWIL

15. *Савенков П.А.* Сравнение методов кластеризации DBSCAN и модифицированного WrapDBSCAN для поиска аномальных перемещений пользователей в мобильной UBA системе // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9, № 4(35). С. 21. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.35.4.007>

Информация об авторах

Александр Владимирович Бондарев – канд. геол.-минерал. наук, геолог технической поддержки, ООО «Интегрированные разработки для моделирования», Москва, Россия; SPIN-код: 6559-1469, <https://orcid.org/0000-0001-8221-1052>; e-mail: jcomtess@yandex.ru

Кирилл Олегович Ровнер – ведущий разработчик 9 категории, ООО «Интегрированные разработки для моделирования», Москва, Россия; <https://orcid.org/0009-0000-7179-8417>; e-mail: rovner1999@gmail.com

Лиана Ильясовна Бондарева – научный сотрудник Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; SPIN-код: 1584-1518, <https://orcid.org/0000-0003-3986-858X>; e-mail: liana_bondareva@ipng.ru

Поступила в редакцию 09.10.2025

Принята к публикации 25.11.2025

NEW METHODS AND TECHNOLOGIES OF STUDYING THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT OF OIL AND GAS BASINS

Original article

A new method for analyzing natural rock fracturing based on well-by-well and interval clustering

Aleksandr V. Bondarev¹, Kirill O. Rovner¹, Liana I. Bondareva² ✉

1 – Integrated Developments for Modeling, 25a Profsoyuznaya St., Moscow, 117418, Russia

2 – Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, 3 Gubkina St., Moscow, 119333, Russia

e-mail: liana_bondareva@ipng.ru

Abstract. *Background.* To model a fractured environment, information is needed on the fracture systems, their directions (azimuths and angles of incidence), concentration of directions, intensity (density) of fractures, opening and permeability. Therefore, in this work, the authors concentrated on the parameters that determine the geometric position and direction of natural fractures. *Objective.* To implement a new method for analyzing natural fracturing, based on well-by-well and interval clustering, for improving the accuracy of predicting the porosity and permeability of productive formations. *Materials and methods.* Natural rock fracturing data from the Yurubcheno-Tokhomskeye field were used, based on fracture clustering in tNavigator software. *Results.* Fracture azimuths and dip angles are determined on the basis of microimager interpretation. The resulting interpretation yields borehole objects with three mandatory parameters: wellbore depth, dip azimuth and dip angle. The study demonstrates that natural fractures formed under different conditions, under the influence of various tectonic stresses, and therefore have different bedding patterns. They belong to different fracture systems with different directions and must be modeled separately using different parameters. Clustering allows one to solve this problem. A comparison of clustering methods was conducted. *Conclusions.* The proposed methods for clustering bedding elements have various practical applications. Automatic clustering of fractures by direction will significantly reduce the time a geologist spends on developing a geological model of a field. At great depths, natural fracturing is a key factor determining rock permeability.

Keywords: fracturing, clustering, geological modeling, seismic attributes, oil and gas fields

Funding: the work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment No. 125021302095-2).

For citation: Bondarev A.V., Rovner K.O., Bondareva L.I. A new method for analyzing natural rock fracturing based on well-by-well and interval clustering. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2025. Vol. 16, No. 4. P. 520–534. (In Russ.).

✉ Liana I. Bondareva, liana_bondareva@ipng.ru

© Bondarev A.V., Rovner K.O., Bondareva L.I., 2025



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Author contributions

Aleksandr V. Bondarev – conceptualization, methodology, writing – original draft.

Kirill O. Rovner – formal analysis, investigation, writing – original draft.

Liana I. Bondareva – visualization, validation, writing – original draft, writing – review & editing.

All the authors approved the final version of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

References

1. Abdrakhmanov M.I., Lapin S.E., Shnayder I.V. Clustering algorithms in express-analysis of seismic data. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019. No. 6. P. 27–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-27-44>
2. Voytekhevsky Yu.L. Cluster analysis in geology: metrics and measures. *Vestnik of Institute of Geology of Komi Science Center of Ural Branch RAS*. 2019. No. 5(293). P. 46–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-5-46-47>
3. Dvoeryadkina N.N., Chalkina N.A. Cluster analysis as a tool for processing geological data. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki*. 2010. No. 49. P. 22–29. (In Russ.).
4. Zoback M.D. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press, 2007. 449 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511586477>
5. Li Y., Wang Q., Chen J. et al. K-means algorithm based on particle swarm optimization for the identification of rock discontinuity sets. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014. Vol. 48, No. 1. P. 375–385. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0569-x>
6. Xu Y., Wu J., Zhao G. et al. II-LA-KM: Improved initialization of a learning augmented clustering algorithm for effective rock discontinuity grouping. *Mathematics*. 2024. Vol. 12, No. 20. P. 3195. <https://doi.org/10.3390/math12203195>
7. Cui X., Yan E. A clustering algorithm based on differential evolution for the identification of rock discontinuity sets. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020. Vol. 126. P. 104181. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104181>
8. Ye F., Chen C.-Y. Alternative KPSO-clustering algorithm. *Tamkang Journal of Science and Engineering*. 2005. Vol. 8, No. 2. P. 165–174. <https://doi.org/10.6180/jase.2005.8.2.09>
9. Shanley R.J., Mahtab M.A. Delineation and analysis of clusters in orientation data. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*. 1976. Vol. 8, No. 1. P. 9–23. <https://doi.org/10.1007/BF01039681>
10. Degterev A.Yu. The hypothesis of stationarity in geostatistics and its influence on the reliability of the created models. In: *Geomodel 2021 – 23th Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development*, Gelendzhik, Russia, 6–10 September 2021. (In Russ.). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202157092>
11. Degterev A., Topchii M., Bondarev A. Improvement possibilities for the open geological model of the Groningen field. In: *SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and*

Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 24–26 January 2023. Paper SPE-212591-MS. <https://doi.org/10.2118/212591-MS>

12. Jimenez-Rodriguez R., Sitar N. A spectral method for clustering of rock discontinuity sets. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006. Vol. 43, No. 7. P. 1052–1061. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.02.003>

13. Li C., Zhou J., Du K., Tao M. Enhanced discontinuity characterization in hard rock pillars using point cloud completion and DBSCAN clustering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2025. Vol. 186. P. 106005. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.106005>

14. Williams M.V., Kuzyakov O.N. Application of Getis-Ord G_i^* and DBSCAN method when prospecting for mineral resources. *Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex*. 2025. No. 1(168). P. 35–41. (In Russ.).

15. Savenkov P.A. Comparison of clustering methods DBSCAN and modified WrapDBSCAN to find abnormal user movements in the mobile UBA system. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021. Vol. 9, No. 4(35). P. 21. (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.35.4.007>

Information about the authors

Aleksandr V. Bondarev – Cand. Sci. (Geol.-Min.), Technical Support Geologist, Integrated Developments for Modeling, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-8221-1052>; e-mail: jcomtess@yandex.ru

Kirill O. Rovner – Ninth Category Leading Developer, Integrated Developments for Modeling, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0009-0000-7179-8417>; e-mail: rovner1999@gmail.com

Liana I. Bondareva – Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3986-858X>; e-mail: liana_bondareva@ipng.ru

Received 9 October 2025

Accepted 25 November 2025