Геофизические технологии. 2024. № 3. С. 33–45. **www.rjgt.ru**

Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 3. P. 33–45.

Научная статья / Original article

УДК 550.834

doi:10.18303/2619-1563-2024-3-33

ПРИМЕНЕНИЕ СЕЙСМОФАЦИАЛЬНОГО АНАЛИЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АТРИБУТОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА КОЛЛЕКТОРОВ

Георгий Михайлович Митрофанов[1,✉], Илья Александрович Коваленко[2], Евгений Игоревич Корыткин[3]

[1,2]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

[1,2]Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,

[1]Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия,

[3]ООО «СахалинНИПИ нефти и газа», 693009, Южно-Сахалинск, ул. Амурская, 53, Россия,

[1]MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru, https://orcid.org/0000-0003-4203-2740

[2]sistem_97@mail.ru

[3]evgeny_korytkin@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-6185-6155

Аннотация. Сейсмофациальный анализ является одним из важнейших этапов качественной динамической интерпретации результатов сейсморазведочных работ. Обобщая значительный опыт анализа сейсмических данных и расчета различных сейсмических атрибутов, он позволяет выполнить идентификацию геологических элементов, проявляющихся в сейсмическом волновом поле. Это дает возможность определить детальное геологическое строение перспективных отложений и выделить сейсмические фации по схожести акустических свойств. В статье приводятся результаты тестирования алгоритма сейсмофациального анализа на реальных данных с использованием двух методик кластеризации: по форме сейсмической записи и по набору сейсмических атрибутов.

Ключевые слова: сейсмофациальный анализ, кластеризация данных, форма сейсмического сигнала, сейсмические атрибуты

Благодарности: Авторы благодарят АО «СНИИГГиМС» за предоставленные сейсмические материалы.

Финансирование: исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ ИНГГ СО РАН (проект Минобрнауки РФ FWZZ-2022-0017).

Для цитирования: Митрофанов Г.М., Коваленко И.А., Корыткин Е.А. Применение сейсмофациального анализа с использованием атрибутов для прогноза коллекторов // Геофизические технологии. 2024. № 3. С. 33–45. doi:10.18303/2619-1563-2024-3-33.

APPLICATION OF SEISMIC FACIES ANALYSIS USING ATTRIBUTES TO RESERVOIR PREDICTION

Georgy M. Mitrofanov[1,✉], Ilya A. Kovalenko[2], Evgeny I. Korytkin[3]

[1,2]Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

[1,2]Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

[1]Novosibirsk State Technical University, K. Marks Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia,

[3]SakhalinNIPI Oil and Gas Ltd, Amurskaya Str., 53, Yuzhno-Sakhalinsk, 693009, Russia,

[1]MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru, https://orcid.org/0000-0003-4203-2740

[2]sistem_97@mail.ru

© Митрофанов Г.М., Коваленко И.А., Корыткин Е.И., 2024

[3]evgeny_korytkin@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-6185-6155

Abstract. Seismic facies analysis is one of the most important stages in the qualitative dynamic interpretation of seismic exploration results. By summarizing considerable experience in the analysis of seismic data and the calculation of various seismic attributes, it allows the identification of geological elements manifesting in the seismic wave field. This makes it possible to determine the detailed geological structure of promising deposits and identify seismic facies based on the similarity of acoustic properties. The article presents the results of testing the seismic facies analysis algorithm on real data using two clustering techniques: by the form of the seismic record and by a set of seismic attributes.

Keywords: seismic facies analysis, data clustering, seismic waveform, seismic attributes

Acknowledgments: The authors thanks to Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials for providing seismic data.

Funding: The study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0017.

For citation: Mitrofanov G.M., Kovalenko I.A., Korytkin E.I. Application of seismic facies analysis using attributes to reservoir prediction // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 3. P. 33–45. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2024-3-33.

ВВЕДЕНИЕ

Основы сейсмофациального анализа, как нового подхода к интерпретации сейсмических данных, были обозначены в статьях П. Вейла, Р. Митчема и их коллег по компании «Exxon», а также других нефтегазовых компаний. Статьи были подготовлены по результатам научно-исследовательского симпозиума, проведенного Американской ассоциацией геологов-нефтяников в 1975 г., и собраны в единую книгу [Payton, 1977], которая многократно переиздавалась за прошедшие годы. В статьях демонстрировались и обсуждались результаты по значительному улучшению сейсмических изображений за счет повышения качества сейсмических данных и возможностей их обработки с применением компьютерных технологий. На русском языке книга была издана в двух частях [Вейл и др., 1982; Шерифф и др., 1982].

Прогрессивные идеи, изложенные в статьях указанной книги, были реализованы сразу в трех новых подходах: сейсмическая стратиграфия, секвенсная стратиграфия и сейсмофациальный анализ. Обозначенные подходы позволили специалистам извлекать из сейсмических данных больше геологической информации. Расширение интерпретационных возможностей заключалось в признании двух положений: значимости для интерпретации слабых нерегулярных отражений и взаимосвязи рисунка сейсмических отражений с условиями осадконакопления изучаемых отложений. Основное внимание было сконцентрировано на выявлении неантиклинальных ловушек.

В своих работах авторы [Вейл и др., 1982] определяют место сейсмофациального анализа в этапности работ по интерпретации данных: «После расчленения сейсмического разреза на ряд комплексов приступают к следующему этапу интерпретации, который состоит в восстановлении обстановки осадконакопления и выявлении литофаций в пределах этих комплексов с помощью сейсморазведочных и геологических данных. Анализ *сейсмических фаций* заключается в прослеживании и интерпретации осей синфазности, их выдержанности по простиранию, в определении амплитуды, частоты отраженных волн и интервальной скорости, а также конфигурации и взаимосвязи сейсмофациальных единиц внутри общей схемы седиментационных комплексов. Там, где проведено

описание и картирование сейсмофаций, интерпретация седиментационных процессов и условий осадконакопления позволяет дать прогноз литологического состава таких сейсмофаций».

Кроме этого авторы в своей работе [Mitchum, 1977] оформляют базовые понятия сейсмофациального анализа в виде словаря в отдельном разделе. До настоящего времени в основных определениях этих понятий принципиально ничего не изменилось:

«Сейсмофациальный анализ – это описание и геологическая интерпретация параметров сейсмических отражений, включая их конфигурацию, непрерывность, амплитудно-частотный спектр и интервальные скорости»;

«Сейсмофациальная единица – это картируемая двухмерная или трехмерная единичная сейсмическая фация, представленная группами отражений, параметры которых, такие как конфигурация отражающих границ, непрерывность, амплитудные и частотные характеристики или интервальные скорости, отличаются от таких же параметров соседних фациальных единиц. После того как для данной сейсмофациальной единицы определены поинтервальные параметры отражений, ее геометрия и положение в пространстве по отношению к другим фациям, можно выполнять интерпретацию этой единичной фации с позиций обстановки осадконакопления и его механизма, а также оценивать литологию слагающих ее пород»;

«Карта сейсмофаций – это карта, на которой показано площадное распределение, очертания, мощность и другие характеристики данной сейсмофациальной единицы или параметра».

Для выделения целевого объекта, который мы будем называть сейсмофациальной единицей, относящейся к сейсмическому горизонту, нам необходимо определить набор признаков, выделяющий данный объект среди других объектов, которые могут быть также связаны с анализируемым горизонтом. В связи с поиском таких признаков начал активно развиваться атрибутный анализ [Chopra, Marfurt, 2007; Ольнева, 2017]. А с целью детализации выделяемых объектов использовались методы кластеризации [Мандель, 1988; Jain et al., 1999].

МЕТОДЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Они предназначены для разделения множества входных *n*-мерных векторов на группы (кластеры) по степени «схожести» друг на друга. Для сравнения векторов по степени «схожести» необходим критерий, на основе которого вектора будут различимы друг от друга. Как правило, таким критерием является расстояние между объектами. При этом объекты одного кластера должны быть максимально близки, а объекты из разных кластеров должны быть максимально удалены. Важным моментом кластеризации является то, что описание групп заранее не определено и производится в процессе разбиения элементов множества на группы.

Одним из геометрических расстояний в конечномерном векторном пространстве является Евклидово расстояние, определяемое как

$$\rho(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2},$$

где x_i, y_i – компоненты *n*-мерных векторов **x**, **y**.

Распространенным методом кластеризации является метод *K*-средних (английское «k-means»). Он был предложен в 1950-х годах математиком Гуго Штейнгаузом [Steinhaus, 1956] и почти одновременно Стюартом Ллойдом [Lloyd, 1957]. Особую популярность приобрел после работы [MacQueen, 1967].

Действие алгоритма, реализующего этот метод, состоит в следующем. Он стремится минимизировать суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центров этих кластеров WCSS (within-cluster sum of squares):

$$\mathrm{WCSS} = \sum_{\mathrm{k}=1}^{K} \sum_{\mathbf{x} \in \mathrm{Sk}} \rho^2(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}_\mathrm{k}),$$

где *K* – число кластеров, Sk – полученные кластеры, векторы $\boldsymbol{\mu}_\mathrm{k}$ определяют центры кластеров, а внутренняя сумма определяет квадраты расстояний элементов кластера до его центра.

Метод прост в реализации и обладает высоким быстродействием. Он разбивает множество элементов векторного пространства на заранее известное число кластеров *K*. Основная идея заключается в том, что на каждой итерации заново вычисляется центр для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге, затем векторы разбиваются на кластеры вновь в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике. Процесс уточнения положения центров кластеров продолжается до тех пор, пока разница между старыми и новыми центрами не достигнет заданного уровня погрешности.

Основная идея, лежащая в основе метода *K*-средних, заключается в определении таких кластеров, что отклонения внутри каждого кластера будут минимальны. Однако перед кластеризацией данных количество кластеров неизвестно, поэтому определение их оптимального количества чаще всего выполняется с помощью «метода локтя» (elbow-method), являющегося эвристическим по своей основе, но позволяющего выполнить оптимизацию числа кластеров [Kodinariya, Makwana, 2013]. Он подразумевает многократное циклическое исполнение алгоритма с увеличением количества выбираемых кластеров, а также последующим графическим изображением функциональной зависимости величины метрики кластеризации от количества кластеров (рис. 1). Метрикой кластеризации является WCSS, описанная выше.

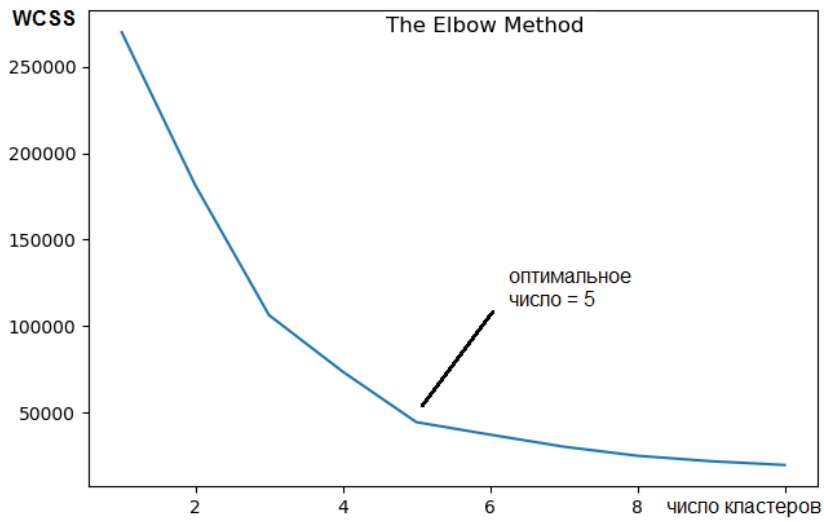

Рис. 1. Метод локтя.

При добавлении нового кластера общее отклонение внутри каждого кластера становится меньше. В конце настанет случай, когда на каждое значение данных будет приходиться отдельный кластер, и тогда отклонение будет равно 0. Оптимальным значением *K* является место перегиба графика, после которого при увеличении количества кластеров уменьшение величины WCSS становится незначительным.

ПРИЗНАКИ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В СТАТЬЕ

Нами были выбраны два типа признаков: форма сейсмического сигнала, относящаяся к исследуемому объекту (горизонту), и атрибуты, представляющие собой некоторые интегральные оценки элементов волнового поля, также связанные с целевым объектом. Оба типа признаков являются широко распространенными в сейсмофациальном анализе. Поэтому интересным представлялся вопрос о том, насколько существенно могут различаться результаты, получаемые по каждому из типов.

Сделаем еще одно замечание, относящееся к выбору используемых атрибутов, которых к настоящему времени насчитывается уже несколько сотен. Из них были отобраны следующие 13 атрибутов: A1 – мгновенная амплитуда, A2 – мгновенная фаза, A3 – мгновенная частота, A4 – доминантная частота, частоты A5 – 20 Гц, A6 – 40 Гц, A7 – 60 ГЦ, A8 – среднеквадратичная амплитуда, A9 – мгновенная амплитуда к мгновенной частоте, A10 – мгновенная ширина полосы частот, A11 – первая производная, A12 – мгновенное качество, A13 – относительный акустический импеданс. Выбор указанных атрибутов определялся авторами исключительно на основе анализа статей, опубликованных в открытых источниках. Краткое описание расчета указанных атрибутов приведено в Приложении. Их полное описание с возможными приложениями дано в книге [Chopra, Marfurt, 2007].

Все используемые значения признаков требуют некоторой предварительной обработки [Coates, Ng, 2012]. В частности, требуется проанализировать и отфильтровать возможные выбросы, которые могут оказать отрицательное влияние на процедуру кластеризации. Так, рассчитанные сейсмические атрибуты сначала были отфильтрованы, чтобы убрать «аномальные» значения, которые могут исказить результат кластеризации, а далее нормализованы от 0 до 1. При этом для каждой карты атрибутов были построены гистограммы распределений. Значениям в точках больше 3σ присвоено среднее значение $\bar{x}$, где среднеквадратичное отклонение σ определяется как

$$\sigma = \sqrt{N^{-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2},$$

где *N* – число элементов карты атрибутов, x_i – i-ое значение карты атрибутов.

С помощью процедуры нормализации данные были приведены $x \to x_{new}$ в диапазоне от 0 до 1:

$$x_{new} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}.$$

На следующем этапе была построена матрица корреляции атрибутов, чтобы отследить взаимосвязи и разделить на группы: хорошо коррелируемые и плохо коррелируемые атрибуты. Матрица корреляции атрибутов получена путем расчета коэффициентов корреляции между всеми парами атрибутов и взятием модуля от полученных коэффициентов корреляции. Для 13 карт атрибутов матрица корреляции имеет размер (13,13). Формула расчета коэффициента корреляции:

$$cor\,(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}},$$

где $\bar{x}$, $\bar{y}$ – средние значения элементов карт атрибутов.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Они были предоставлены АО «СНИИГГиМС» и включали в себя результаты обработки данных 3D съемки, выполненной на одной из площадей Лено-Тунгусской провинции. При этом передавались часть сейсмического куба, являющегося окончательным результатом обработки по месторождению Лено-Тунгусской провинции; отражающий горизонт кровли целевого пласта *Kv*, относящийся к кровле терригенного комплекса венда; отражающий горизонт подошвы целевого пласта R_0, относящийся к кровле рифейский отложений.

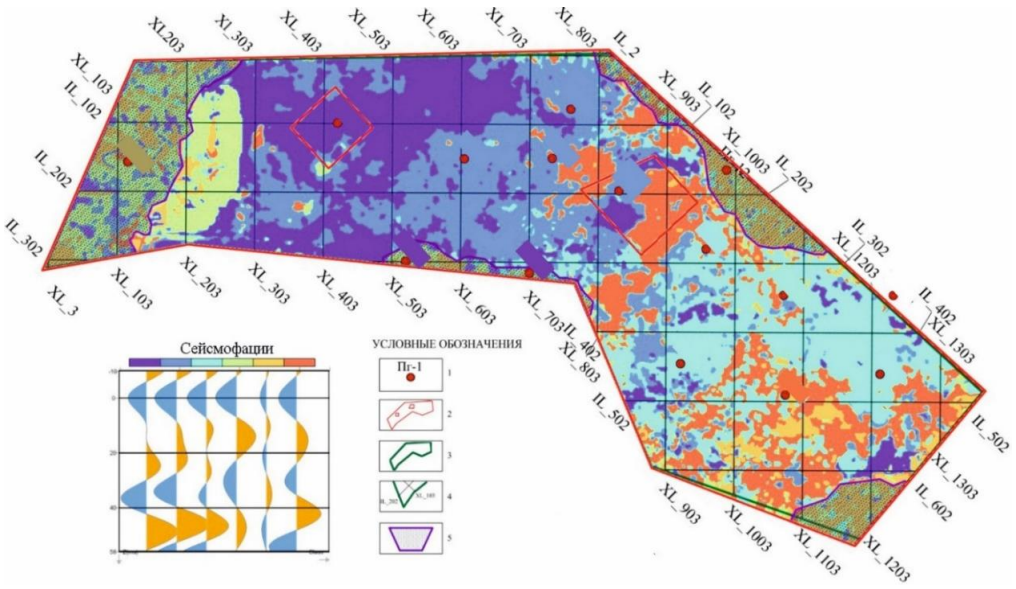

Рис. 2. Карта сейсмофаций, построенная в АО «СНИИГГиМС».

Также была передана карта сейсмофаций, построенная коллегами из АО «СНИИГГиМС» в импортном пакете «OpendTect», созданным голландской компанией dGB Earth Sciences. Карта строилась на основе формы сигналов, относящихся к целевому интервалу, включающему отражения от пластов *Kv* и R_0. Вид карты и формы сигналов, выступающих в качестве центроидов, показаны на рис. 2.

ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ ПО ФОРМЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ

Независимо от построенной ранее карты, на основе разработанных алгоритмов, нами выполнялся процесс определения формы сигналов для целевого интервала, который выбирался от линии корреляции отражающего горизонта *Kv* с длительностью 60 мс. Количество кластеров было выбрано равным шести по аналогии с картой сейсмофаций АО «СНИИГГиМС» для последующего сопоставления результатов. Кластеризация проводилась с помощью метода *K*-средних, являющегося оптимальным по объему вычислительных операций [Jain et al., 1999]. Число кластеров равнялось шести и совпадало с тем, что получено сотрудниками АО «СНИИГГиМС».

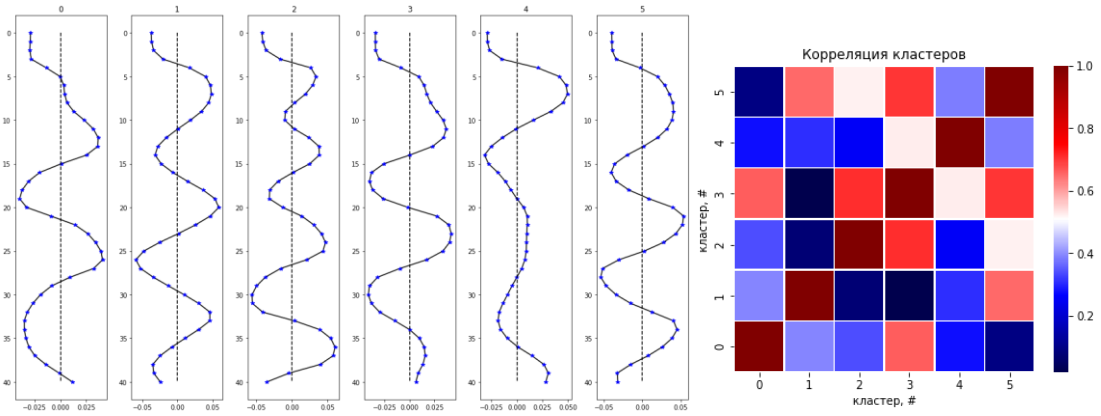

Рис. 3. Центроиды кластеров (слева) и матрица их корреляции (справа).

Сравнение центроидов, полученных нами (рис. 3) и специалистами АО «СНИИГГиМС» (см. рис. 2), указывает на их различие. Причина этого различия могла быть связана с выбором линии корреляции, а также длительности целевого интервала. Отметим еще один момент, относящийся к особенностям разработанных программ. При расчете значений матрицы корреляций между кластерами выполняется перебор от кластеров с наибольшими номерами и наименьшими номерами. Это приводит к тому, что значения равные 1 расположены на побочной диагонали матрицы.

На основе выполненной кластеризации была создана карта, приведенная на рис. 4. Интересным представляется тот факт, что несмотря на отличие определяемых центроидов кластеров, для двух видов карт была получена схожая структура.

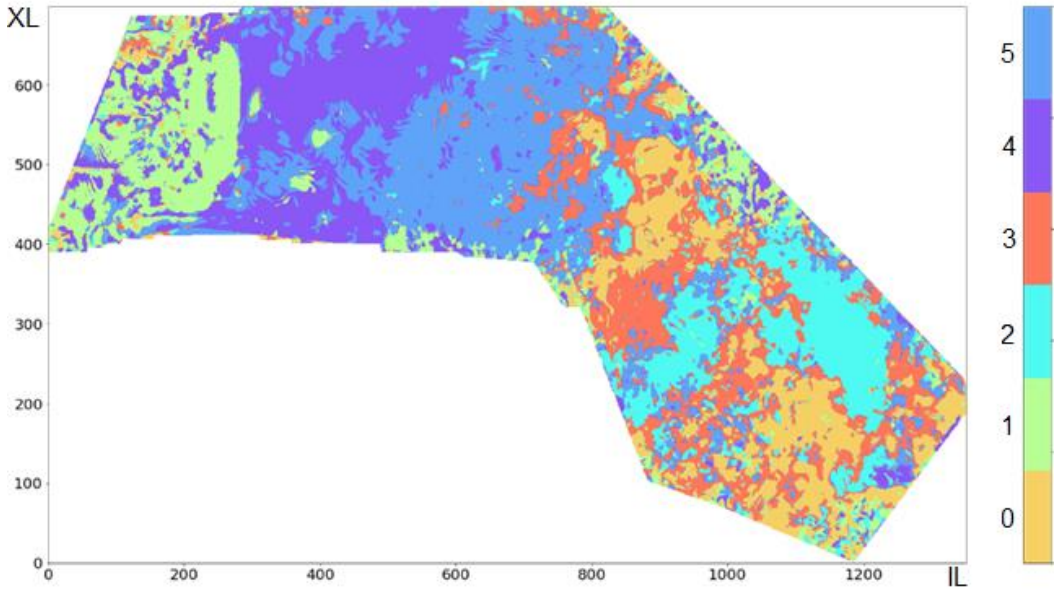

Рис. 4. Карта сейсмофаций, построенная на основе созданных алгоритмов (справа показана цветовая палитра кластеров).

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ПО АТРИБУТАМ

Для построения сейсмофациальных карт по данному типу признаков первоначально были построены карты, отвечающие соответствующим атрибутам (рис. 5). Они отражают изменчивость динамических и петрофизических свойств сейсмической среды, которые детально описаны в [Chopra,

Marfurt, 2007]. Затем, согласно с изложенными выше рекомендациями, значения атрибутов были отфильтрованы по критерию 3σ, чтобы исключить выбросы, оказывающие существенное влияние на последующие результаты объединения признаков и построение сейсмофациальных карт. Также была выполнена нормализация атрибутов с приведением значений в интервал [0, 1].

Далее была построена матрица корреляции всех атрибутов, на которой отчетливо выделяются две группы атрибутов (рис. 6): хорошо коррелирующие между собой и обладающие низким коэффициентом корреляции между собой.

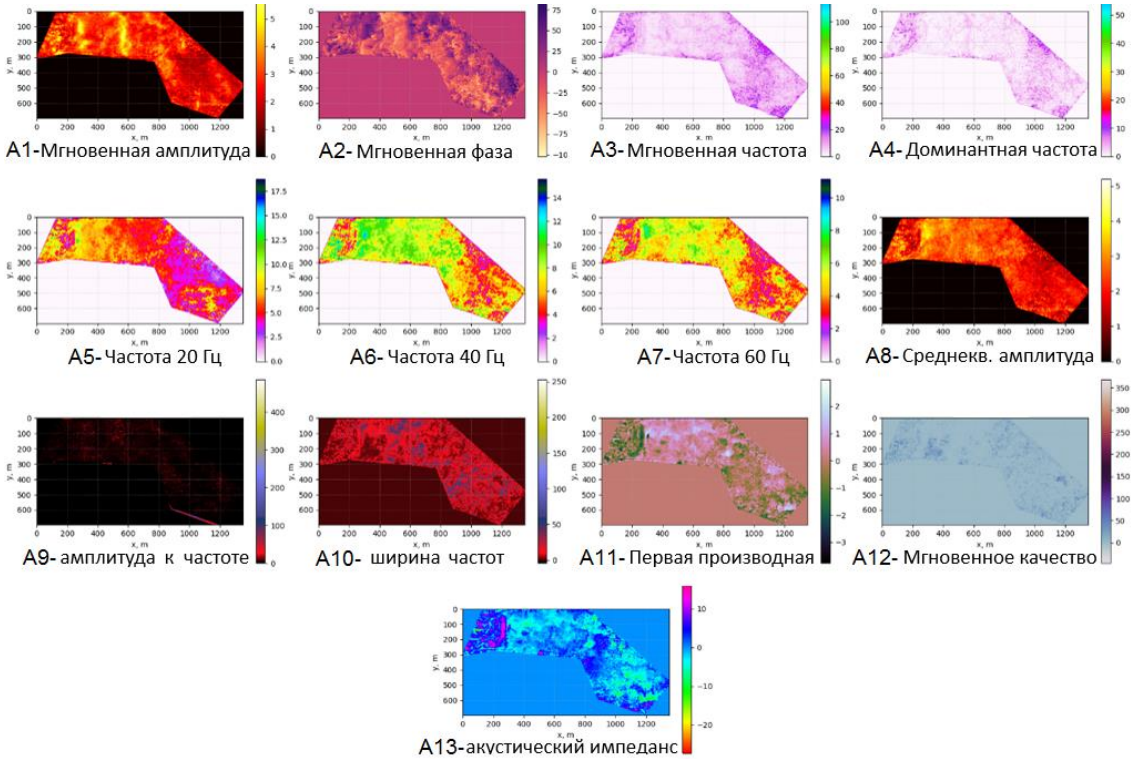

Рис. 5. Карты сейсмических атрибутов, используемых при анализе данных и построении карт сейсмофаций.

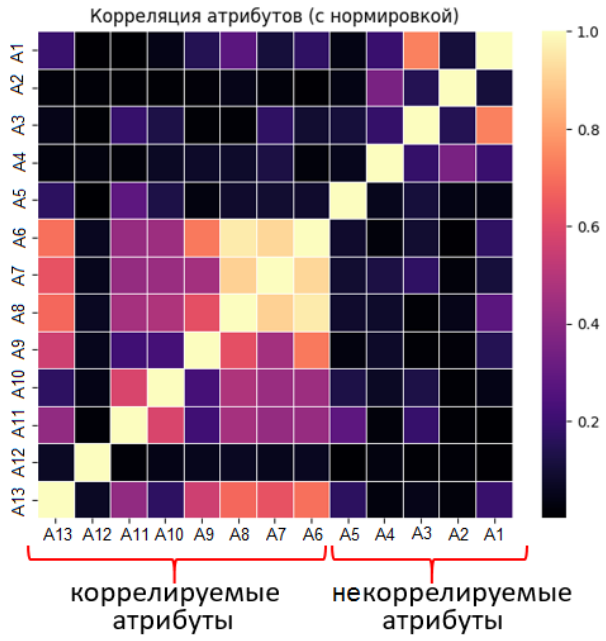

Рис. 6. Матрица корреляции сейсмических атрибутов.

Результаты кластеризации по трем группам атрибутов: коррелируемым, слабо коррелируемым и полной совокупности атрибутов с построением соответствующих карт представлены на рис. 7–9. При выполнении кластеризации количество кластеров выбиралось на основе метода локтя.

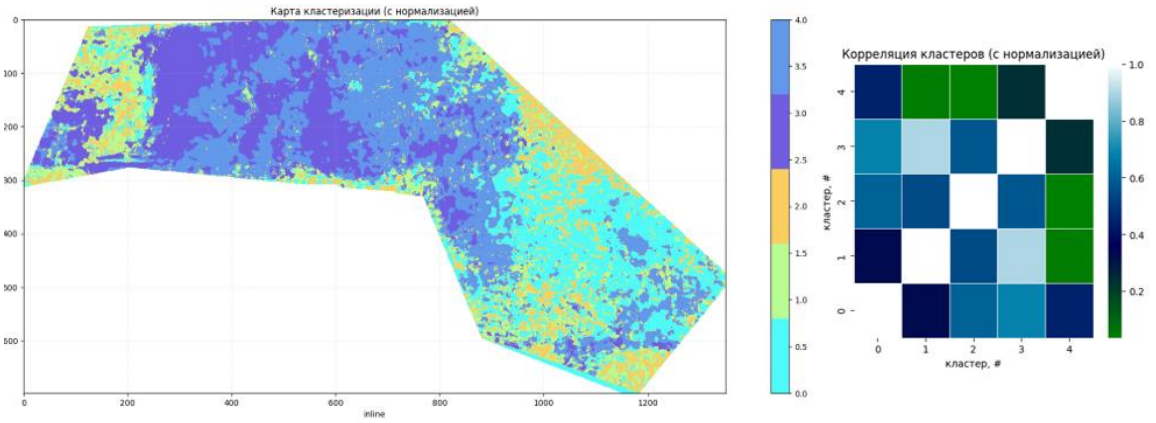

Рис. 7. Результаты кластеризации по коррелируемым атрибутам.

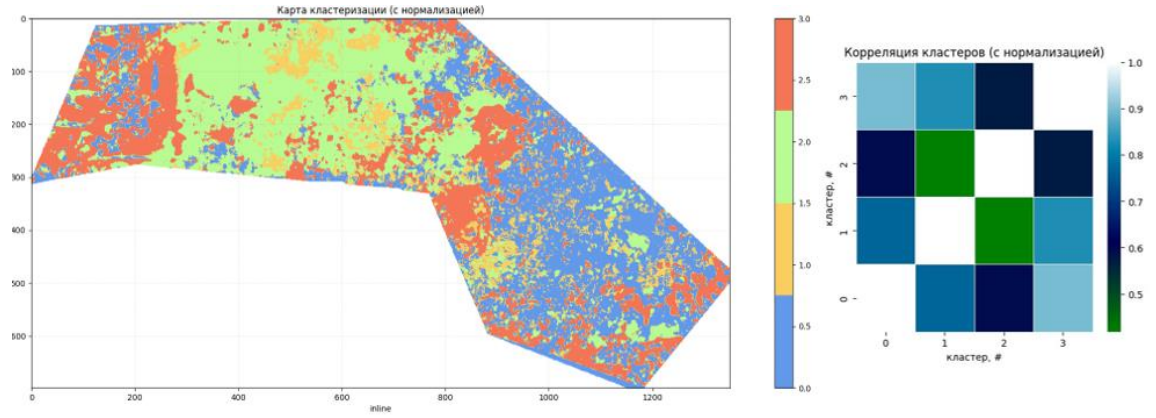

Рис. 8. Результаты кластеризации по слабо коррелируемым атрибутам.

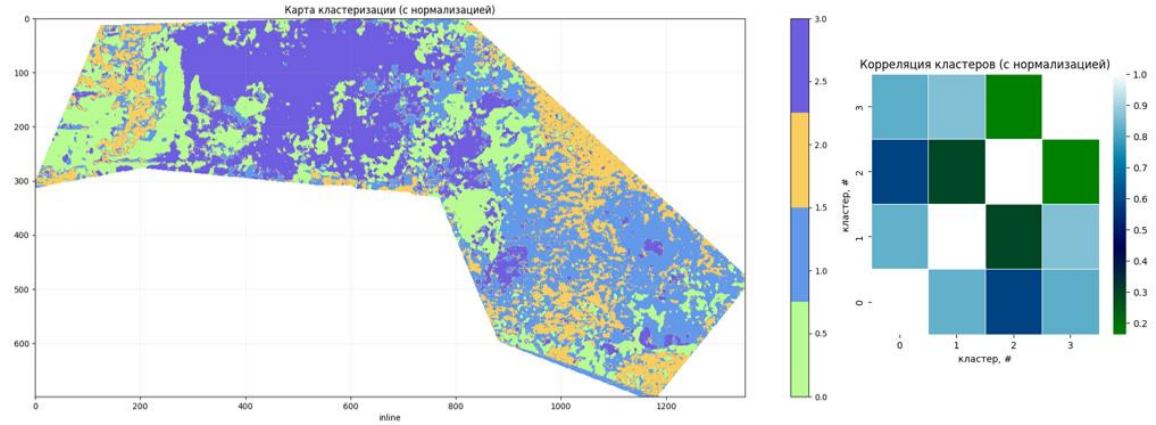

Рис. 9. Результаты кластеризации по всем атрибутам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты атрибутного анализа, выполненного с использованием алгоритмов и программных модулей, разработанных в ИНГГ СО РАН, показали, что наилучшее визуальное соответствие с картой сейсмофаций, построенной сотрудниками АО «СНИИГГиМС», имеет карта, построенная в результате

кластеризации по форме сейсмической записи (см. рис. 4), и карта кластеризации по слабо коррелируемым атрибутам (рис. 8). На указанных картах выделяются две основные сейсмофации, которые находятся в западной и восточных областях исследуемого участка, между ними прослеживается переходная фация.

Экспертиза полученных результатов, проведенная в АО «СНИИГГиМС», позволяет сделать выводы о том, что реализованные программные разработки позволяют обеспечивать сейсмофациальный анализ, не уступающий импортным ПО Petrel и OpendTect.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Вейл П.Р., Грегори А.П., Митчем Р.М. мл., Шерифф Р.Е. Сейсмическая стратиграфия. Использование при поисках и разведке нефти и газа. Часть 1. М.: Мир, 1982. 375 с.

Мандель И.Д. Кластерный анализ. М.: Финансы и Статистика, 1988. 176 с.

Ольнева Т.В. Сейсмофациальный анализ. Образы геологических процессов и явлений в сейсмическом изображении. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2017. 157 с.

Тяпкин Ю.К., Бельфер И.К., Погожев В.М., Мушин И.А., Митрофанов Г.М. Оценка возможностей использования мгновенных динамических характеристик сейсмических записей при поисках нефти и газа // Разведочная геофизика, Обзор ВИЭМС. М.: Недра, 1986. 76 с.

Шерифф Р.Е., Грегори А.П., Вейл П.Р., Митчем Р.М. мл. Сейсмическая стратиграфия. Использование при поисках и разведке нефти и газа. Часть 2. М.: Мир, 1982. 467 с.

Chopra S., Marfurt K.J. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization // SEG Geophysical Development Series. 2007. No 11. 465 p.

Coates A., Ng A.Y. Learning feature representations with K-means // G. Montavon, G.B. Orr, K.-R. Muller (Eds.), Neural Networks: Tricks of the Trade, 2nd Edition. Springer, Berlin, 2012. P. 561–580. doi:10.1007/978-3-642-35289-8_30.

Jain A., Murty M., Flynn P. Data clustering: A review // ACM Computing Surveys. 1999. Vol. 31 (3). P. 264–323. doi:10.1145/331499.33150.

Kodinariya T.M., Makwana P.R. Review on determining number of cluster in K-means clustering // International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies. 2013. Vol. 1 (6). P. 90–95.

Lloyd S.P. Least squares quantization in PCM // IEEE Transaction on Information Theory. 1982. Vol. IT-28 (2). P. 129–137.

MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations // Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. University of California, Los Angeles LA USA, 1967. P. 281–297.

Mitchum R.M. Jr. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 11: Glossary of terms used in seismic stratigraphy // C.E. Payton (Ed.) Seismic Stratigraphy–Applications to Hydrocarbon Exploration: AAPG, Memoir 1977. Vol. 26. P. 117–143. doi:10.1306/M26490C13.

Payton C.E. (Ed.) Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir. 1977. Vol. 26.

Steinhaus H. Sur la division des corps materiels en parties // Bulletin L'Académie Polonaise des Science.1956. Vol. 4 (12). 1956. P. 801–804.

REFERENCES

Chopra S., Marfurt K.J. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization // SEG Geophysical Development Series. 2007. No 11. 465 p.

Coates A., Ng A.Y. Learning feature representations with K-means // G. Montavon, G.B. Orr, K.-R. Muller (Eds.), Neural Networks: Tricks of the Trade, 2nd Edition. Springer, Berlin, 2012. P. 561–580. doi:10.1007/978-3-642-35289-8_30.

Jain A., Murty M., Flynn P. Data clustering: A review // ACM Computing Surveys. 1999. Vol. 31 (3). P. 264–323. doi:10.1145/331499.33150.

Kodinariya T.M., Makwana P.R. Review on determining number of cluster in K-means clustering // International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies. 2013. Vol. 1 (6). P. 90–95.

Lloyd S.P. Least squares quantization in PCM // IEEE Transaction on Information Theory. 1982. Vol. IT-28 (2). P. 129–137.

MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations // Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. University of California, Los Angeles LA USA, 1967. P. 281–297.

Mandel I.D. Cluster analysis. Finance and Statistics, Moscow, 1988. 176 p.

Mitchum R.M. Jr. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 11: Glossary of terms used in seismic stratigraphy // C.E. Payton (Ed.) Seismic Stratigraphy–Applications to Hydrocarbon Exploration: AAPG, Memoir 1977. Vol. 26. P. 117–143. doi:10.1306/M26490C13.

Olneva T.V. Seismofacies analysis. Images of geological processes and phenomena in seismic images. Institute of computer research, Moscow, Izhevsk, 2017. 157 p.

Payton C.E. (Ed.) Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir. 1977. Vol. 26.

Sheriff R.E., Gregory A.P., Vail P.R., Mitchum R.M. Jr. Seismic stratigraphy. Application in oil and gas exploration and prospecting. Part 2. Mir, Moscow, 1982. 467 p.

Steinhaus H. Sur la division des corps materiels en parties // Bulletin L'Académie Polonaise des Science.1956. Vol. 4 (12). 1956. P. 801–804.

Tyapkin Yu.K., Belfer I.K., Pogozhev V.M., Mushin I.A., Mitrofanov G.M. Evaluation of the Possibilities of Using Instantaneous Dynamic Characteristics of Seismic Records in Oil and Gas Prospecting // Exploration Geophysics, VIEMS Review. Nedra, Moscow, 1986. 76 p.

Vail P.R., Gregory A.P., Mitchum R.M. Jr., Sheriff R.E. Seismic stratigraphy. Application in oil and gas prospecting and exploration. Part 1. Mir, Moscow, 1982. 375 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Первые три атрибута: мгновенная амплитуда (A1), мгновенная фаза (A2), мгновенная частота (A3) являются традиционными при динамическом анализе сейсмических записей [Тяпкин и др., 1986]. При их расчете выполняется переход от исходной трассы $x(t)$ к ее аналитической форме с применением преобразования Гильберта, которое формирует мнимую составляющую, являющуюся ортогональным дополнением трассы:

$$z(t) = x(t) + \bar{i}y(t),$$

где $\bar{i}$ – мнимая единица. Построение $z(t)$ лучше выполнять с переходом в спектральную область, вычисляя спектр исходной трассы. Значения функций $x(t), y(t)$ позволяют определить значения указанных атрибутов, как интегральных оценок, относящихся к исследуемому интервалу записи $\mathrm{T} = [t1, t2]$:

$$\mathrm{A1} = \sum_{t\in \mathrm{T}} \mathrm{R}(t), \quad \mathrm{R}(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)},$$

$$\mathrm{A2} = \sum_{t\in \mathrm{T}} \varphi(t), \quad \varphi(t) = \mathrm{arctg}\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right),$$

$$\mathrm{A3} = \sum_{t\in \mathrm{T}} \omega(t), \quad \omega(t) = \frac{d\,\varphi(t)}{d\,t}.$$

С этими атрибутами связан A9, представляющие отношение A1 к A3, т. е.

$$\mathrm{A9} = \mathrm{A1} \cdot \mathrm{A3}^{-1}.$$

2. Расчет доминантной частоты производился следующим образом. Целевой интервал трассы разбивается на окна, содержащие *N* отсчетов. Число отсчетов определяется отношением $\Delta T / \Delta t$, где ΔT – длительность окна, а Δt – шаг дискретизации. Затем рассчитывается дискретный спектр Фурье по формуле:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp(-\bar{i}\, 2\pi\, knN^{-1}),$$

где *k* – номер отсчета спектра, определяющий величину частоты, $x_n = x(t_n)$ – значение трассы на соответствующем времени. По полученным значениям спектра определяется частота с максимальной амплитудой спектра, что является доминантной частотой для данного окна. Перебор всех возможных окон позволяет определить доминантную частоту для целевого интервала f_{dom}. Таким образом, определяется значение атрибута $\mathrm{A4} = f_{dom}$.

3. При определении значений атрибутов A5, A6, A7 выполняется стандартный расчет спектра Фурье по целевому интервалу и берутся величины амплитудного спектра на указанных частотах: 20, 40, 60 Гц, соответственно.

4. При расчете значения атрибута A8 в целевом интервале трассы, содержащем *N* отсчетов, выполняется определение среднеквадратической амплитуды (RMS). В результате получаем

$$\mathrm{A8} = \sqrt{N^{-1} \sum_{n=1}^{N} x_n^2}.$$

5. Атрибут A10 представляет собой стандартное отклонение спектра мгновенной мощности относительно его среднего значения. Требуемые значения спектра мощности рассчитывались на основе автокорреляционной функции исходной трассы $x(t)$.

6. При расчете значения атрибута A11 используются сглаженные значения атрибута A1, по которым определяется абсолютное значение производной от огибающей по времени или мера скорости относительного изменения амплитуды.

7. Атрибут A12 также является составным из атрибутов A3 и A10:

$$A12 = A3 \cdot (2A10)^{-1}.$$

8. Для получения значения A13 требуется осуществить переход к трассе, представленной последовательностью акустических импедансов. Выполнить высокочастотную фильтрацию (например, фильтром Баттерворта) для уменьшения потенциально вносимого низкочастотного шума. Затем для целевого интервала определить сумму результирующих акустических импедансов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка методов и технологий обработки и интерпретации сейсмических данных, решение обратных задач геофизики.

КОВАЛЕНКО Илья Александрович – аспирант Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: атрибутный и сейсмофациальный анализ, разработка алгоритмов определения характеристик целевых геологических объектов.

КОРЫТКИН Евгений Игоревич – аспирант Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, начальник отдела ГРР ООО «СахалинНИПИ нефти и газа». Основные научные интересы: развитие технологий прогноза коллекторских свойств целевых горизонтов.

Статья поступила в редакцию 28 октября 2024 г.,
одобрена после рецензирования 18 ноября 2024 г.,
принята к публикации 19 ноября 2024 г.