



# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОНИЦАЕМОСТИ ТРЕЩИН ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН

*В статье описываются возможности применения алгоритмов машинного обучения для определения трещиноватости и количественной оценки трещинной проницаемости по данным ГИС вулканогенных пород Рогожниковского-Назымского грабена. Проведен расчет условной вероятности коллектора по формуле Байеса, определены функции вероятности появления проводящей трещины по петротипам. По модели Тиба-Дональдсона определена проницаемость трещин, построены функции изменения вероятности в зависимости от пористости и петротипа. В заключительном разделе сформулированы основные выводы.*

**Ключевые слова:** машинное обучение, проницаемость, трещинный коллектор, вероятность, вулканиты, математическое ожидание, проницаемость трещин, раскрытость трещин.



**Руденко В.Ю.**  
ЗАО «МиМГО»  
Заведующий сектором  
интерпретации ГИС  
rudenko@mimgo.ru



**Гуренцов Д.Е.**  
ЗАО «МиМГО»  
Геофизик 1-й категории  
gurentsov@mimgo.ru

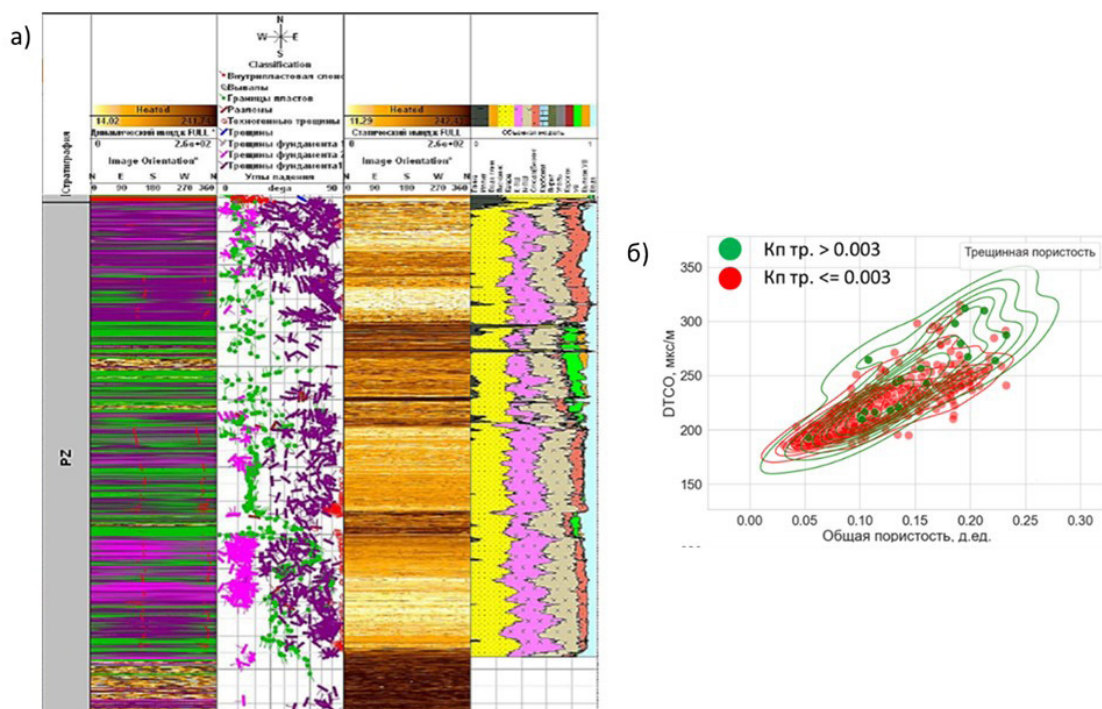
В настоящее время практически все запасы углеводородов на месторождениях приурочены к категории трудноизвлекаемых, среди которых значительную часть составляют коллекторы со смешанной трещинно-кавернозной структурой емкостного пространства. Одним из примеров таких отложений являются вулканиты отложения доюрского комплекса (ДЮК) Западной Сибири. В настоящей статье рассмотрены продуктивные пермско-триасовые кислые вулканиты Рогожниковско-Назымского грабена, представляющие из себя неоднородные полиминеральные породы с широкой вариативностью коллекторских свойств, развитой системой разнонаправленных трещин с различной длиной, густотой, раскрытостью, степенью залеченности [1].

Трещиноватость оказывает значительное влияние на проницаемость коллекторов, которая, в свою очередь, является одним из основных петрофизических параметров, определяющих степень продуктивности объекта. Вследствие отмеченных особенностей изучаемых отложений, стандартные подходы к интерпретации ГИС, в том числе и к выделению трещинных интервалов и количественной оценке проницаемости, имеют ряд существенных ограничений, основные из которых:

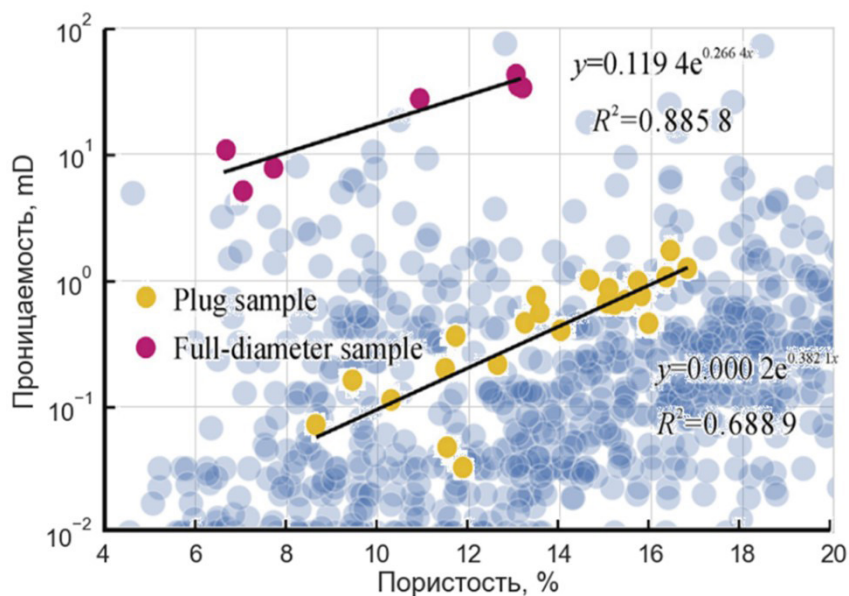
- Взаимокомпенсация факторов «мягких» и «жестких» структур или в случае использования электрических методов «слабо» и «сильно» проводящих структур, в результате чего трещины будут проявляться лишь на локальных, сильно выраженных интервалах, которые могут составлять не более 1% от всех их проявлений
- Влияние характера насыщения и проводящих минералов на результат интерпретации (при использовании методики «блоковой пористости»)
- Низкая раскрытость и частичная залеченность для подавляющего числа трещин
- Сложная структура нетрещинной ёмкости вулканитов
- Смещенная выборка лабораторных замеров проницаемости на керне (невозможность отбора образца из интервала трещины)

Изучаемые отложения характеризуются густой системой трещин, развитой не в локальных зонах, а встречающихся повсеместно, что отчетливо видно, как на результатах интерпретации электрических микросканеров, **рис.1 (а)**, так и по данным керна, в описании каждого слоя которого в той или иной мере присутствует упоминание трещин. Пример характеристики трещинных и нетрещинных интервалов в поле параметров ГИС показан на **рис. 1 (б)**. Анализ данного графика позволяет сделать вывод о том, что провести разделение трещинных и нетрещинных интервалов по данным ГИС с применением стандартных подходов не представляется возможным.

Проблематику смещенной выборки при лабораторных исследованиях стандартных цилиндрических образцов диаметром 30 мм можно наглядно продемонстрировать при сопоставлении с данными полноразмерных образцов керна. Данное сравнение проведено с данными керна пермских вулканитов основного состава Сычуаньской впадины Юго-Запада Китая, **Рис. 2** [7]. На рисунке жёлтые точки – данные стандартных образцов Сычуаньской впадины; красные – данные полноразмерных образцов Сычуаньской впадины; голубые точки – данные стандартных образцов керна Рогожниковско-Назымского грабена.



**Рис.1.** Пример интерпретации данных электрического микросканера FMI для одной из скважин рассматриваемых отложений (а), во втором треке розовым обозначены непроводящие трещины, фиолетовым - проводящие; связь общей пористости с интервальным временем пробега продольной волны с дифференциацией данных по наличию проводящих трещин (б).



**Рис.2.** Сравнение связи пористости и проницаемости для отложений вулканитов Сычуаньской впадины Юго-Запада Китая и Назымско-Рогожниковского грабена. Жёлтые точки- данные стандартных образцов; красные – данные полно-размерных; голубые точки данные Рогожниковско-Назымского грабена.

Как видно из рисунка, различие проницаемости замеров на стандартных образцах керна, которые характеризуют проницаемость матрицы, и полноразмерных, которые в большей степени определяют проницаемость трещин, составляет два порядка. Хотя химический состав вулканитов Сычуаньской впадины не соответствует Назымско-Рогожниковскому, являясь основным, тем не менее, механизмы появления трещин в них практически идентичны. Аналогично и в изучаемых отложениях, проницаемость, замеренная на стандартных цилиндрических образцах, не может в полной мере отражать фильтрационные характеристики породы в целом.

В настоящей статье рассмотрен разработанный авторами способ количественной оценки трещиноватости и проницаемости трещин неоднородных отложений кислых вулканитов Западной Сибири, основанный на применении алгоритмов машинного обучения.

**Способ оценки трещиноватости**

Вследствие сложности модели связи параметров трещиноватости со стандартным комплексом ГИС, с одной стороны, и недостаточной разрешающей способности методов, с другой, явно определить трещиноватость по стандартному комплексу ГИС не представляется возможным. Поэтому, для количественного определения наличия трещин использовался метод условной вероятности Байеса [2].

Теорема Байеса – одна из основных теорем элементарной теории вероятностей, которая позволяет определить вероятность события при условии, что произошло другое статистически взаимозависимое с ним событие. Другими словами, по формуле Байеса можно более точно пе-

ресчитать вероятность, взяв в расчёт как ранее известную информацию, так и данные новых наблюдений. Формула Байеса может быть выведена из основных аксиом теории вероятностей, в частности из условной вероятности.

Формула Байеса имеет вид:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

где P(A) – априорная вероятность гипотезы A; P(A|B) – вероятность гипотезы A при наступлении события B (апостериорная вероятность); P(B|A) – вероятность наступления события B при истинности гипотезы A; P(B) – полная вероятность наступления события B.

При этом важно, что событие B может рассматриваться в форме вектора.

Расчет условной вероятности проводился по условиям группировки петротипов, предварительно выделенных по данным ГИС с использованием алгоритмов случайный лес и иерархическая кластеризация [1, 3], а также по условию пористости (на каждом срезе пористости, равному одному проценту). Вероятность определялась на каждом шаге квантования методов ГИС, равному 0.1 м, по материалам интерпретации данных электрических микроимиджеров (FMI), согласно следующей схеме:

1. Данные по присутствию трещин по результатам интерпретации FMI преобразовываются к бинарному виду;
2. Общая выборка разделяется на отдельные выборки по петротипам и по группам петротипов;
3. Определяются центры присутствия трещин и пористости для всей выборки и от-



дельно по петротипам и проверяются на достоверность по дисперсии и статистике, недостоверные центроиды фильтруются;

4. Создаются словари кусочных линейных функций  $P(A|B)=f(Kп\_общ)$ , определенных между центроидами для всей выборки, для петротипов и групп петротипов;

5. Суммарная вероятность характеризует количество интервалов в 0.1 м с присутствием трещин. Чем больше окно суммирования, тем достовернее результат.

Кусочные функции задаются отдельной формулой на каждом из интервалов, составляющих область её определения. Формальная запись системы уравнений кусочных функций при заданных точках  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$  выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{ll} f_0(x), & x < x_1 \\ f_1(x), & x_1 < x < x_2 \\ \dots & \\ f_n(x), & x_1 < x \end{array} \right.$$

При интерпретации данных ГИС такой вид функции полезен для формирования модели сложного функционального закона с дальнейшим использованием данной модели путём машинного расчёта. Преимуществом применения такого подхода является значительное уточнение приближения расчёта к значению искомого параметра, не зная полной модели, что является типичной ситуацией при интерпретации геологических данных.

На **рис. 3** показаны изменения вероятности трещин для окна 0,1м в зависимости от пористости по различными петротипам. Группировка данных проводилась по генезису пород. На **рис. 3 (а)** показаны петротипы вулканогенно-обломочного генезиса, на **рис. 3 (б)** – неоднозначного либо смешанного генезиса, на **рис. 3 (в)** – эффузивного генезиса. На каждом из графиков показана обобщенная функция по типу генезиса. На графиках точками показано математическое ожидание вероятности трещин, линиями – кусочные функции. Каждый петротип обозначен индивидуальным цветом.

Как видно из рисунков, в целом для всех пород наблюдается тенденцию увеличения вероятности трещин со снижением пористости, что обосновывается увеличением хрупкости пород. Однако для отдельных петротипов, вариации трендов могут быть самыми разными, что обусловлено сложностью модели связи появления трещин с параметрами данных стандартного комплекса ГИС и пористости. Также важно обратить внимание на вариативность присутствия

трещин для различных петротипов, в целом для эффузивных пород характерна значительно большая изменчивость вероятности трещин от 0 до 50% по различным петротипам. По этой причине для расчета вероятности трещин очередного интервала необходимо в первую очередь рассматривать модель локального петротипа. В случае отсутствия в разработанном «словаре» совпадающих условий для отнесения петротипа к той или иной категории, необходимо обращаться к глобальным группировкам общего генезиса.

Нужно также понимать, что вероятность в окне квантования не равна трещиноватости, для того чтобы оценить непосредственно трещиноватость, необходимо суммировать вероятность в широком окне, примером такого окна может быть типичный интервал для испытания (10-15 метров), чем шире окно, тем достовернее оценка.

#### Способ определения проницаемости трещин

Для определения проницаемости использовалась адаптированная модель Тиба-Доналдсона [4], которая представляет из себя следующее уравнение:

$$Kпр.тр = 8,44 \cdot 10^{-4} \cdot E^2 \cdot Kптр,$$

Суть данной модели в использовании при определении проницаемости трещин параметра трещинной пористости ( $Kп тр.$ ) и раскрытости ( $E$ ). Для адаптации применялся поиск математических ожиданий параметров раскрытости и трещинной пористости для шага 0.1 м по условиям однопроцентных срезов общей пористости каждого из петротипов.

На **рис. 4** показаны изменения вероятности математических ожиданий параметров раскрытости, пористости и густоты трещин соответственно, по условиям однопроцентных срезов общей пористости и петротипов (который отражён цветом и индексом).

По анализу графиков (**рис. 4**) отмечаются высокие значений густоты трещин при низкой раскрытости для лавовых петротипов и наоборот, слабая густота при высокой раскрытости для вулканогенно-обломочных, что для проницаемости является взаимокомпенсирующими факторами. Также нужно отметить возрастание трещинной пористости в интервале общей пористости от 6 до 15%.

Данные математических ожиданий параметров пересчитываются в проницаемость трещин дифференцированно для однопроцентных срезов общей пористости и петротипов. Результаты пересчёта представлены на **рис. 5**. Маленькими голубыми точками показаны данные замеров на стандартных образцах керна, большими разноцветными – математические ожидания проницаемости трещин по условиям однопроцентных сре-

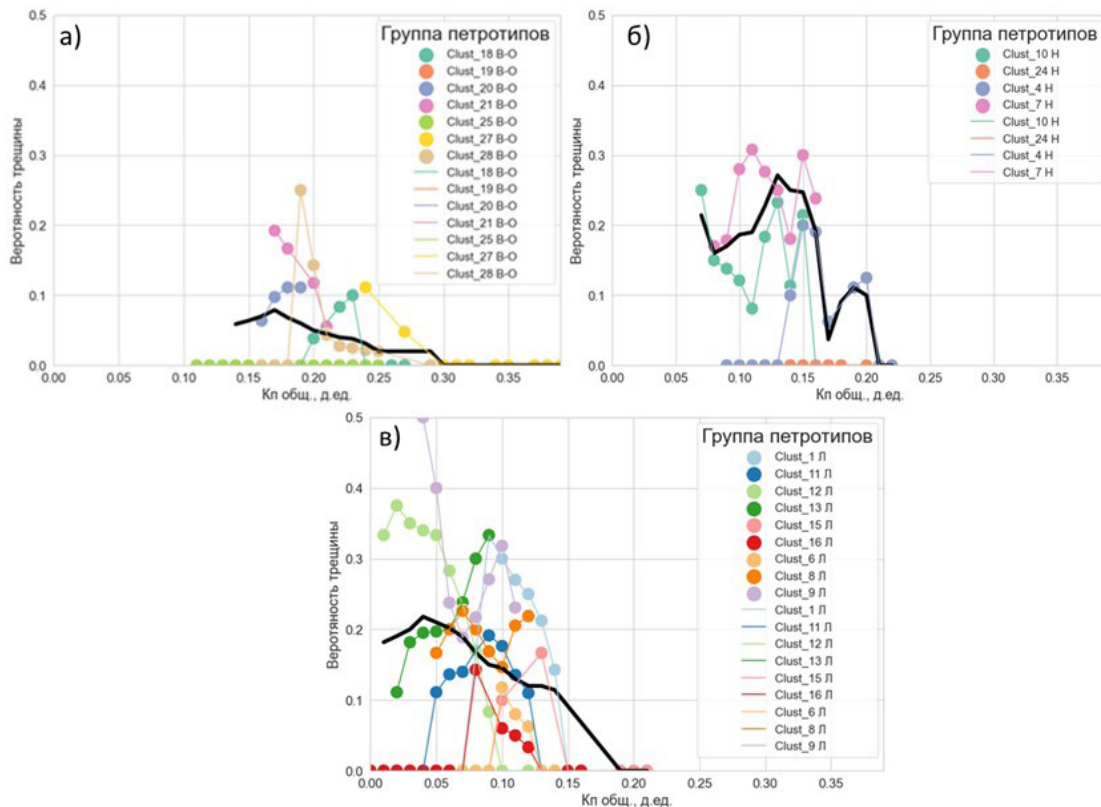


Рис.3. Вероятность трещин при условиях изменения пористости и петротипа вулканогенно-обломочного генезиса (а), неоднозначного либо смешанного генезиса (б), эффузивного генезиса (в).

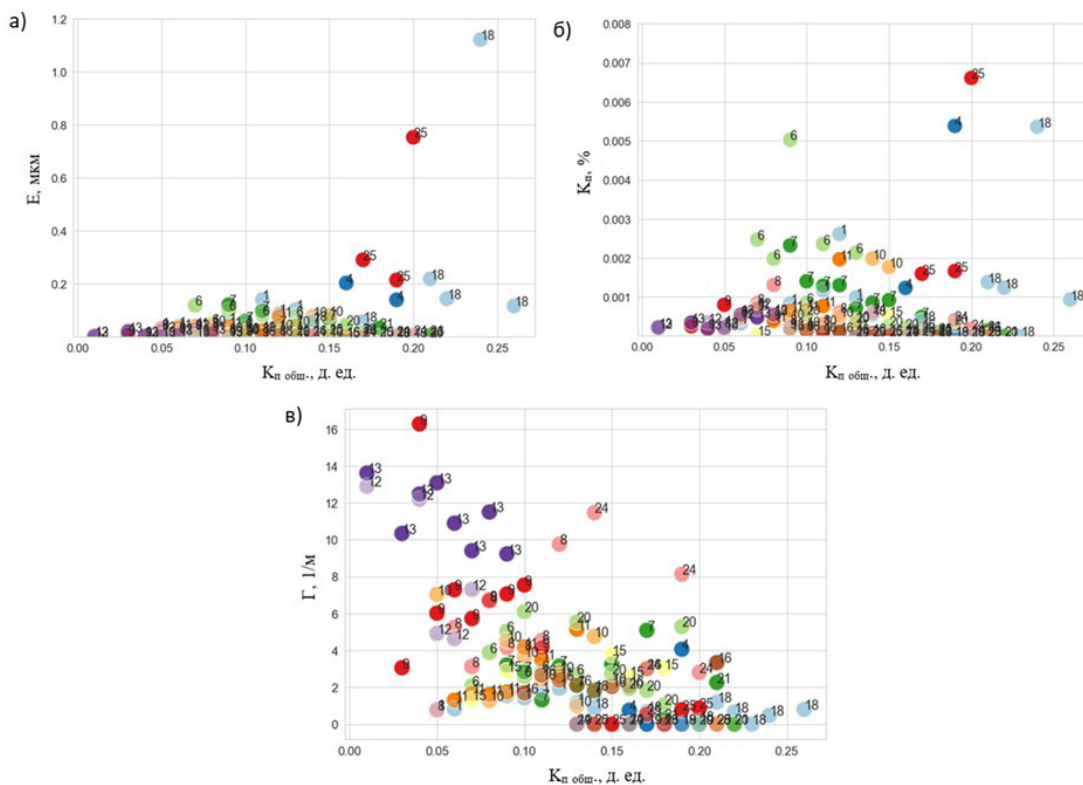


Рис.4. Зависимость раскрытости трещин (а), пористости трещин (б), густоты трещин (в) от общей пористости для различных петротипов.

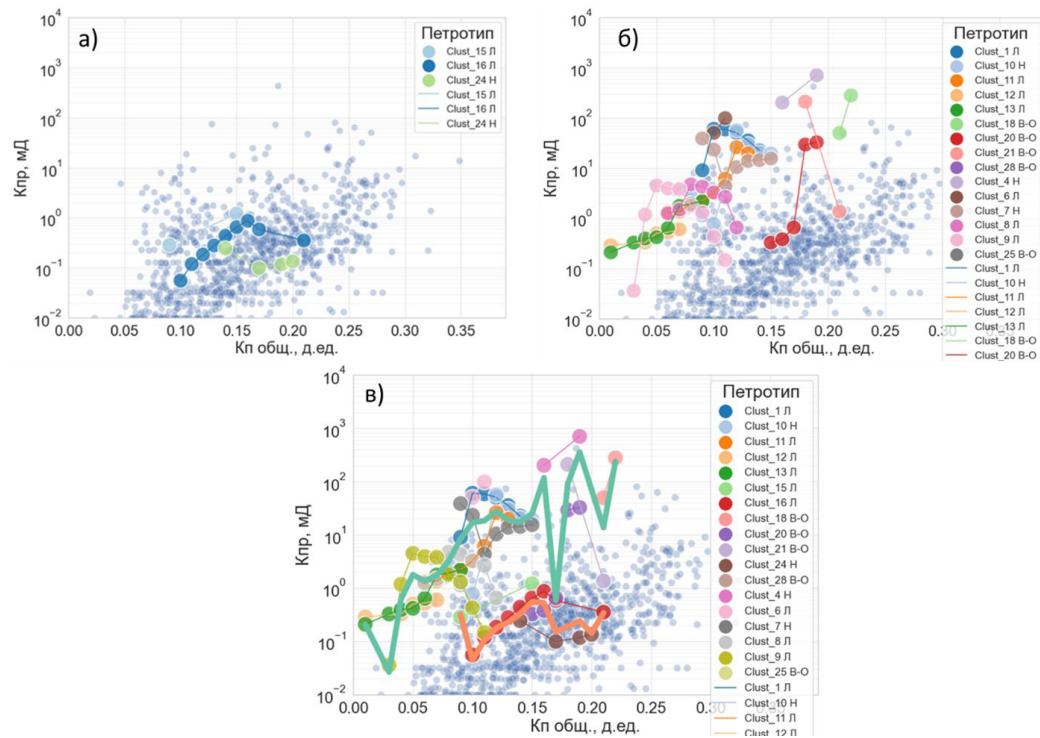


Рис.5.

Зависимость проницаемости трещин от общей пористости, для петротипов с низкими значениями  $K_p$  тр (а), для петротипов со средними и высокими значениями  $K_p$  тр (б), обобщения математических ожиданий трещинной проницаемости различных категории свойств (в).

зов пористости и петротипа, тонкими линиями – кусочные степенные функции между математических ожиданиями. На графиках показаны зависимости проницаемости трещин от общей пористости для петротипов с низкими значениями  $K_p$  тр (а), со средними и высокими значениями  $K_p$  тр (б), а также обобщения математических ожиданий для петротипов с ухудшенной проницаемостью трещин и всех остальных свойств (в).

Анализируя графики (рис. 5) можно отметить, что петротипы вулканогенно-обломочного генезиса с индексами 28 и 25 практически не имеют трещинной проницаемости, что говорит о том, что их проницаемость будет определяться только проницаемостью матрицы. Также обращает на себя внимание, что трещинная проницаемость петротипов не группируется по принципу общего генезиса. Отмечается ухудшенная проницаемость для петротипов с индексами 15, 16 и 24. Обобщение математических ожиданий показывает резкое падение трещинной проницаемости в области 17% общей пористости, что, вероятно, говорит об условной границе сокращения встречаемости петротипов лавового генезиса.

Таким образом, имея словарь кусочных степенных функций проницаемости трещин в зависимости от общей пористости для различных петротипов, возможно выполнять расчёт этого параметра при интерпретации данных стандартного комплекса ГИС.

**Результаты**

Результаты расчета проницаемости показаны на планшете на рис. 6. В треке «Вероятности» показаны кривые вероятности порового (синяя) и трещинного (красная) коллектора. В треке «Проницаемость» показаны проницаемость трещин (красная), проницаемость матрицы (синяя), а также проницаемость по керну (черные точки).

Применение описанного в статье способа определения трещиноватости с помощью условной вероятности позволило провести расчет появления проводящих трещин. Такой способ позволяет детально оценивать всю неопределённость на каждом из шагов условий, что повышает достоверность оценки этого параметра в широком интервале изучения. Результаты расчетов указывают на тенденцию снижения вероятности появления проводящих трещин с повышением пористости, что объясняется уменьшением хрупкости. Однако такие трещины обладают большей раскрытостью и проницаемостью.

Разработанный способ расчёта проницаемости трещин на основе подхода комбинирования кусочных степенных функций для петротипов позволяет существенно повысить точность и достоверность оценки проницаемости трещин, а также объясняет вариативность притоков по данным ПГИ, и также является основой для применения модели двойной пористости при построении гидродинамической модели.



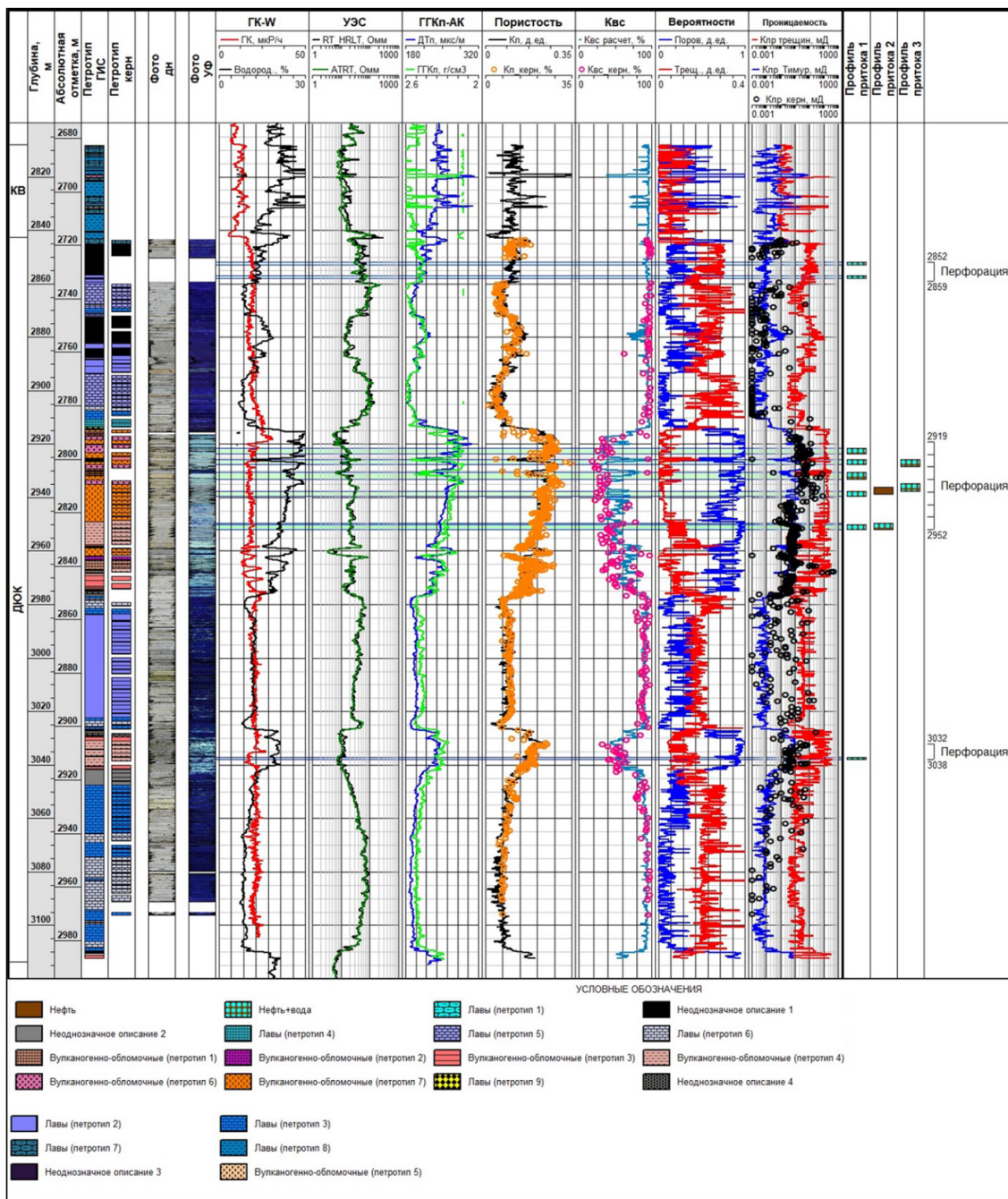


Рис.6. Результаты обработки и интерпретации данных ГИС.

**Выводы**

Применение авторских алгоритмов, заключающихся в комплексировании стандартных подходов к интерпретации ГИС и элементов машинного обучения, позволяет количественно определить вероятность наличия проводящих трещин, что невозможно сделать в явном виде по стандартному комплексу ГИС.

Разработанная модель может использоваться для расчета трещиноватости и проницаемости трещин в скважинах с отсутствием записи элек-

трических микроимиджеров. Используя принципы теории больших чисел [10], проводится переход от вероятностной оценки трещиноватости и проницаемости трещин к детерминированной и определению потенциала скважины.

Применение данного подхода перспективно и актуально также для широко распространенных в Западной и Восточной Сибири пород карбонатного состава, которые в силу своей хрупкости зачастую имеют развитую густую систему трещин, а также выщелоченные полости в виде каверн. XXI

Литература

1. Руденко В.Ю., Гуленцов Д.Е., Смирнова М.Е., Куликов П.Ю., Гаврилов С.С. к.г.-м.н. Применение методов иерархической классификации при формировании пространства классов в задаче по определению типов пород методами геофизических исследований скважин // НЕФТЯНОЕ ХОЗЯЙСТВО. – 2022. – № 4. – С. 20-25.
2. Руденко, В. Ю. Применение вероятностного подхода к определению эффективных толщин на основе теоремы Байеса в отложениях кислых вулканитов Западной Сибири / В. Ю. Руденко, Д. Е. Гуленцов, С. С. Гаврилов. – // Материалы международных научно-практических конференций «инновационные решения в геологии и разработке триз» «цифровая трансформация в нефтегазовой отрасли», 17-18 ноября 2022. – Нефтяное хозяйство, 2022.
3. Руденко В. Ю. Комплексирование технологий машинного обучения в петрофизике // Каротажник. – 2022. – № 3. – С. 70-85.
4. Тиаб, Д. Петрофизика : теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов / Д. Тиаб, Э. Ч. Доналдсон ; пер. с англ. М. Д. Углова , под ред. В. И. Петерсилье, Г. А. Былевского. – 2-е изд., доп. – Москва : Премиум Инжиниринг (Промышленный инжиниринг), 2009. – 838 с.
5. Добрынин, В.М. Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа / В.М. Добрынин. – М. : Недра, 1970. – 239 с.
6. Боронин, П.А. Выделение интервалов трещиноватости и обоснование параметров трещин отложений доюрского комплекса / П.А. Боронин, Н.В. Гильманова, Н.Ю. Москаленко // Известия вузов. Нефть и газ. – 2021. – № 1. – С. 9–19.
7. Г. Су, Ч. Ли, Х. Ли, Д. Ин, Г. Ли, С. Дин, С. Тянь, Х. Лю. Характер наложения в южной части Сычуаньской впадин по данным сейсмического профиля Лушань Чишуй (Китай), полученного методом отраженных волн/ Геология и геофизика, 2021. – 747с.
8. В.Г.Крупин, А.Л.Павлов. Л.Г. Попов., Высшая математика. «Теория вероятностей. Математическая статистика. Случайные процессы»/ Издательский дом МЭИ, 2013. – 71с.
9. Харин Ю. С. Теория вероятностей, математическая и прикладная статистика: учебник / Ю. С. Харин, Н. М. Зуев, Е. Е. Жук. - Минск: БГУ, 2011. - 463 с.
10. Чистяков В.П., Курс теории вероятностей: Учеб. – 3-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит. – 1987. – 240с.

UDC: 550.8.053

V. Yu. Rudenko, CJSC «MiMGO», Head of Petrophysics and Well Logs Analysis Department, rudenko@mimgo.ru  
 D. E. Gurentsov, CJSC «MiMGO», Geophysicist, gurentsov@mimgo.ru

## APPLICATION OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR FRACTURE PERMEABILITY CALCULATION WHEN PETROPHYSICAL EVALUATIONS

**Abstract:** The article describes the possibilities of machine learning algorithms application to determine fractured reservoir and calculation of fracture permeability of volcanogenic rocks of the Rogozhnikovsky-Nazym downthrown block using logging data. The calculation of the transition probability of the reservoir was carried out using the Bayes formula, the probability functions of the fracture occurrence were determined depending on petrotype. Using the Thiab-Donaldson model, the permeability of fractures was determined, and functions of probability changes were determined depending on porosity and petrotype. In the final part of the article main conclusions are presented.

**Keywords:** machine learning, permeability, fractured reservoir, probability, volcanic rocks, expected mean, fracture permeability, fracture opening.