

Расчет петрофизической инверсии на основании гибридных моделей в вулканогенных породах кислого состава доюрского комплекса Западной Сибири

■ Руденко В.Ю., Гуренцов Д.Е., Гарилов С.С., Смирнова М.Е., ЗАО «МиМГО», г. Москва

Введение

Любое решение геологической задачи подразумевает под собой принятие некоторых допущений и упрощений. Так, например, наиболее распространённый на текущий момент метод построения объемных минеральных моделей основан на линейном решении матрицы уравнений. В то же время, сами по себе модели связи отклика физического параметра с изменением минеральных объемов в лучшем случае могут быть лишь псевдолинейными, проблема также усугубляется тем, минеральный набор в стандартных решениях принимается неизменным, что в природе практически не встречается. В случаях слабой вариативности минерального состава пород, небольшого набора учитываемых компонентов (как правило до 3-4) и наличия псевдолинейности физического отклика СЛАУ (система линейных алгебраических уравнений) даёт вполне достоверные результаты. Однако, для более сложных пород, для которых нарушается один трёх озвученных принципов, необходимо разрабатывать и применять более сложные технологии. Одним из таких решений является авторская технология «GS Petrophysics», которая рассмотрена в данной статье на примере отложений кислых вулканических пород доюрского комплекса Западной Сибири.

Общие принципы технологии

Инверсия давно зарекомендовала себя как алгоритм, использующийся для решения многих задач нефтегазовой отрасли. История формирования инструмента петрофизической инверсии началась около 50 лет назад. Первые указа-

ния на поиск $x_1, x_2, x_3, \dots$ в задачах типа $y_j = F_j(x_1, x_2, x_3, \dots, A_{j1}, A_{j2}, \dots)$ через СЛАУ упоминаются в работах (Элланский, 1978), (Еникеев, 1978), (Гольцман, 1971), (Халфин, 1972), (Турчин и др., 1970).

Наибольшее распространение в мире метод инверсии получил после работ (Mitchell and Nelson, 1988), (Mitchell and Nelson, 1991), где решение было представлено в уже знакомом всем виде (1) и (2):

$$S_i = \sum_{j=1}^m e_{ij} V_j, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

где S_i – показания i -го метода ГИС, линейно связанные с объёмным содержанием каждой из слагающих его породообразующих компонентов, e_{ij} – теоретические значения i -ого параметра для j -ого компонента, V_j – объёмное содержание j -ого компонента, m – число объёмных компонентов, участвующих в расчёте, n – число используемых методов ГИС.

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(m_i - S_i)^2}{\tau_i^2 + \delta_i^2}} \quad (2)$$

где n – количество переменных в уравнении, m_i – измеренные значения параметра i , S_i – рассчитанные значения геофизического параметра i , τ – отклонение, характеризующее неопределённость измеряемого аппаратурой ГИС значения, δ_i – отклонение, характеризующее неопределённость при задании значения геофизического параметра i компонента породы.

В 2020 году был разработан и включён в ФИПС под № 2021610214 алгоритм (Руденко, Приезжев 22, 23, 24) который сводится к изменению уравнений (1) и (2) до (3) и (4):

$$S_i = \sum_{j=1}^m f(e_{ij}, \delta_{ij}) f(V_j, \delta_{Vj}), \quad i = 1, \dots, n$$

$$\begin{cases} DT = \sum_{j=1}^m f(e_{DT}, \delta_{DT}) f(V_j, \delta_{Vj}), \quad j = 1, \dots, m \\ RHO_B = \sum_{j=1}^m f(e_{RHO_B}, \delta_{RHO_B}) f(V_j, \delta_{Vj}), \quad j = 1, \dots, m \\ W = \sum_{j=1}^m f(e_W, \delta_W) f(V_j, \delta_{Vj}), \quad j = 1, \dots, m \\ GK = \sum_{j=1}^m f(e_{GK}, \delta_{GK}) f(V_j, \delta_{Vj}), \quad j = 1, \dots, m \\ 1 = \sum_{j=1}^m V_j, \quad j = 1, \dots, m \end{cases} \quad (3)$$

при условии, что $e_{i \min} < f(e_{ij}, \delta_{ij}) < e_{i \max}$
и $V_{j \min} < f(V_j, \delta_{Vj}) < V_{j \max}$

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(f(m_i, \delta m_i) - S_i)^2}{\tau_i^2 + \delta_i^2}} \quad (4)$$

при условии, что $m_{i \min} < f(m_i, \delta_i) < m_{i \max}$,

где δ_{ij} – стандартное отклонение значения i -ого параметра для j -ого компонента, δ_{Vj} – стандартное отклонение j -ого компонента.

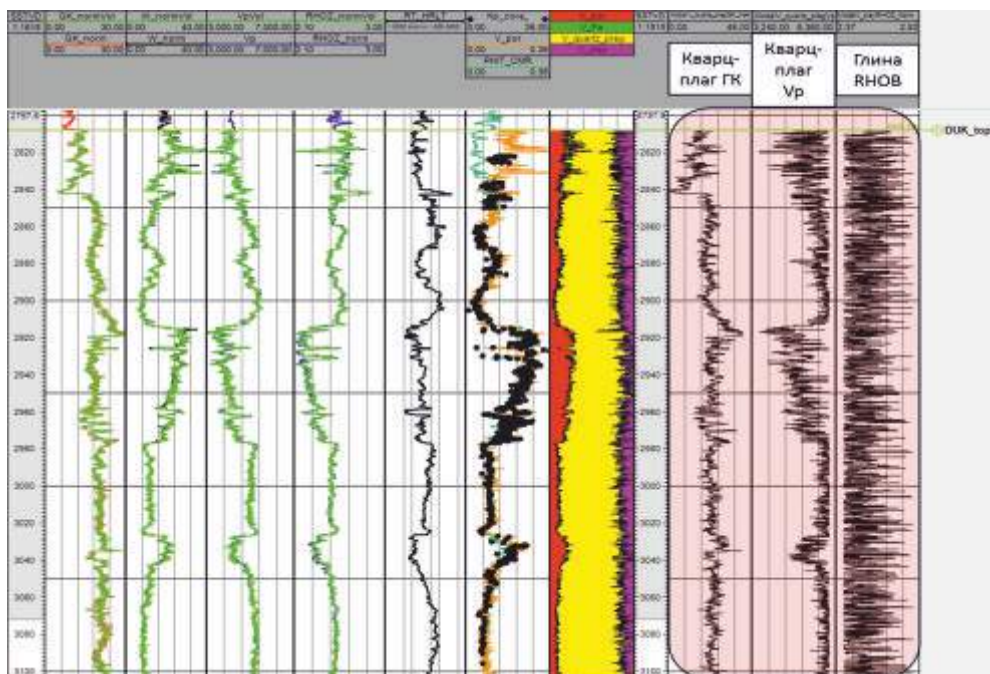
В таком варианте при сохранении общего линейного подхода к решению матрицы, нелинейность связей тем не менее, будет учитываться через дисперсию параметров e_{ij} и V_{ij} , определяемых с помощью стохастических принципов, причем стартовое значение e_{ij} также изменяется с учётом ближайшего реше-

ния на каждом шаге среза глубин. Ключевой особенностью такого расчёта является возможность получить по данным ГИС не только непосредственно минеральные объёмы, но и физические параметры выделенных чистых объёмов, так называемые конечные точки (минеральных смесей). Благодаря этому можно видеть, как меняются физические характеристики той или иной маркирующей смеси минералов, например, плотность чистых глинистых минералов с глубиной, Рис. 1.

Применение GS Petrophysics для расчета объемной модели

Дюжурский комплекс (ДЮК) Западной Сибири включает в себя пермско-триасовые образования, распространенные в грабенообразных структурах платформы и представленные кислыми вулканогенными породами дацит-риолитового состава. Учитывая многокомпонентность минерального состава, лучшим решением расчёта ФЕС для данным пород является применение объёмных моделей.

В связи с тем, что детальные исследований керна проводились параллельно с работами по петрофизической инверсии, разработка объёмной модели проводи-



▶ Рис. 1. Пример расчета объемной модели с помощью технологии GS-Petrophysics. Красной областью выделены примеры параметров чистых минеральных смесей. В шестом треке показано сравнение пористости по модели (оранжевая), ЯМК (зеленая) и по керну (черные точки).



▲ Рис. 2. Итерации расчета объемной модели.

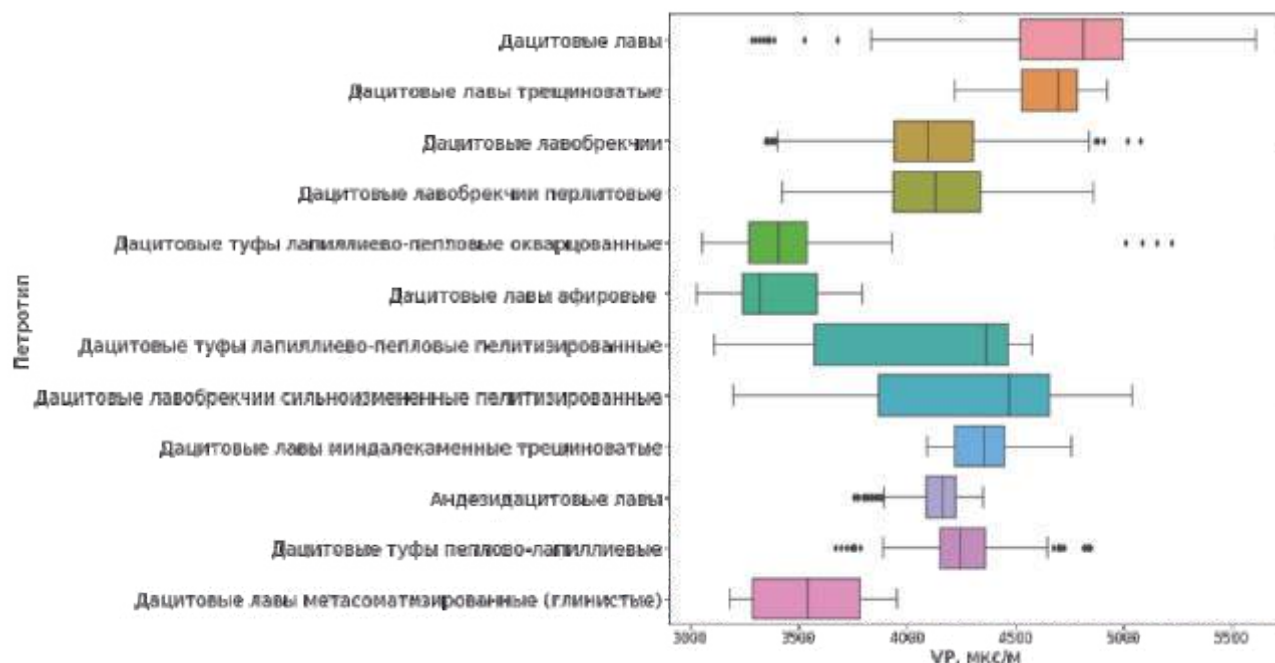
лась итеративно. С получением новых знаний о минерально-петрографическом составе пород модель корректировалась. Например, на первой итерации рассматривались 5 компонентов: кварц, плагиоклаз, КПШ, глина, поры. Ввиду

▼ Рис. 3. Настроенные параметры объемной модели.

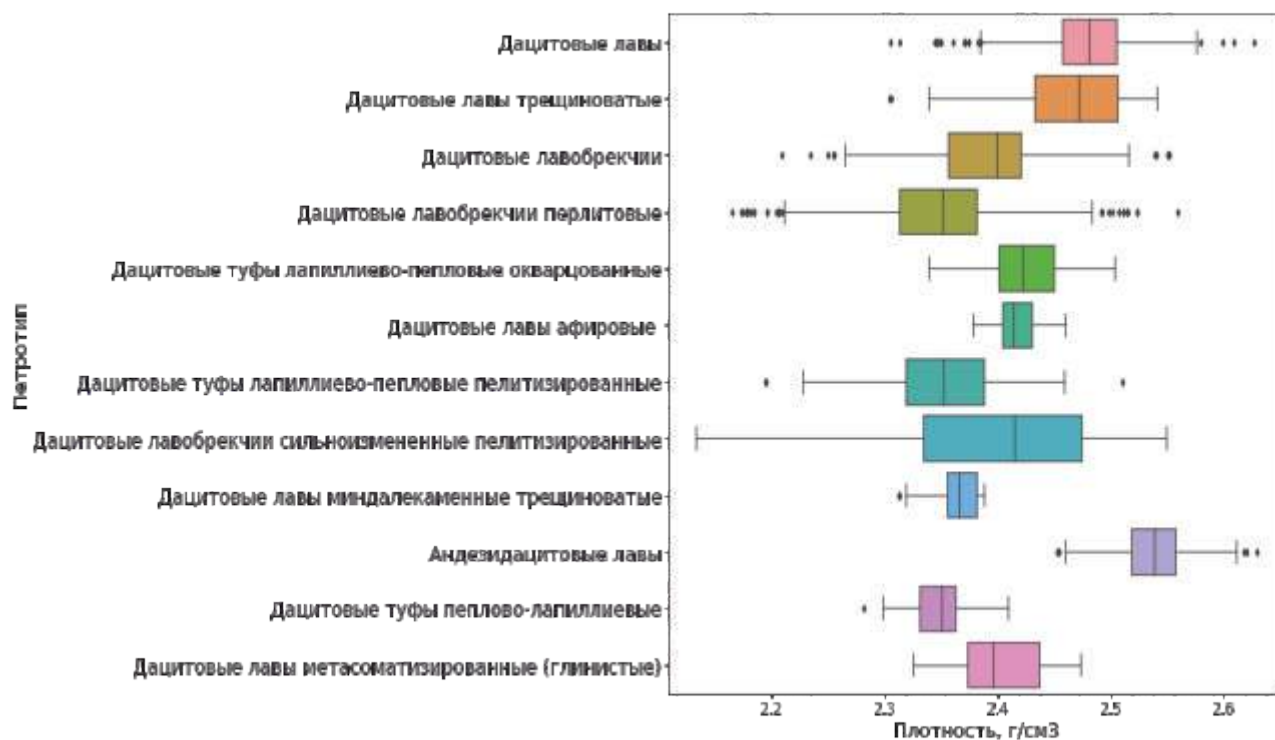
Пористость				
	Volume min	0	Volume max	0.4
	Volume mean	0.12	Volume standard	0.02
	EndPoint	Std	Min	Max
VP, м/с	1610	42	1580	1640
RHOV, г/см ³	1.01	0.021	1	1.03
W, %	100	0	100	100
GK, мкР/ч	4	3.5	0	5
Минеральная смесь кварц+КПШ+плагиоклаз				
	Volume min	0.2	Volume max	1
	Volume mean	0.6	Volume standard	0.3
	EndPoint	Std	Min	Max
VP, м/с	6060	1690	3500	6100
RHOV, г/см ³	2.65	0.05	2.623	2.67
W, %	-3	5.6	-4	10
GK, мкР/ч	10	15	0	40
Глинистые минералы				
	Volume min	0	Volume max	0.6
	Volume mean	0.15	Volume standard	0.08
	EndPoint	Std	Min	Max
VP, м/с	2900	1190	1400	4000
RHOV, г/см ³	2.52	0.15	2.41	2.78
W, %	22	2	5	36
GK, мкР/ч	15	7	5	30
Железистые минералы				
	Volume min	0	Volume max	0.25
	Volume mean	0.05	Volume standard	0.1
	EndPoint	Std	Min	Max
VP, м/с	5950	500	5600	6500
RHOV, г/см ³	7.87	3	4	7.87
W, %	0	0	0	0
GK, мкР/ч	5	5	0	10

отсутствия контраста физических свойств на ГИС, кварц и плагиоклаз были объединены в объем «кварц-плагиоклазовой смеси». Также, анализ массового содержания элементов и оксидов показал наличие высокого содержания железа в ряде скважин (до 12 % массовых), которое обязательно должно быть учтено для корректного определения объемов, в том числе и пористости. В итоговом варианте модель состоит из 4 объемов минеральных смесей: поры; кварц + плагиоклаз + КПШ; железистые минералы, глинистые минералы и слюды. Схематично итерации расчета объемной модели показаны на Рис. 2.

Далее была построена объемная минеральная модель с соответствующими значениями чистых объемов (ЗЧО) минеральных смесей по технологии «GS-Petrophysics», результаты показаны на Рисунке 1. На планшете можно видеть, как меняются физические характеристики той или иной маркирующей смеси минералов (например, плотность чистых глинистых минералов с глубиной). На планшете в первых четырех треках показаны входные методы ГИС и реконструированные кривые в результате моделирования (зеленые). Полная сходимость



▲ Рис. 4. Графика box-plot для подгрупп петротипов по скорости пробега акустической волны.



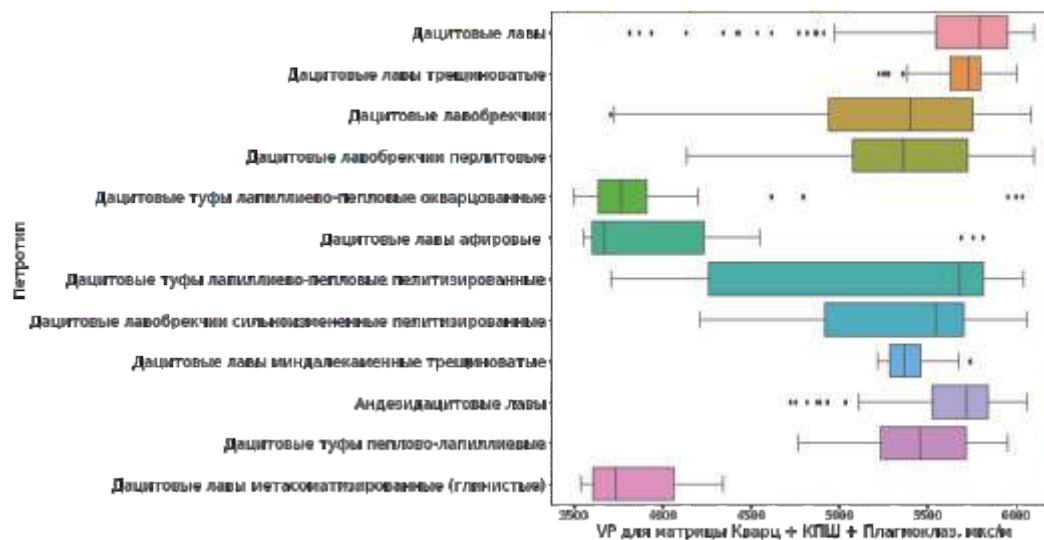
▲ Рис. 5. Графика box-plot для подгрупп петротипов по плотности.

этих кривых говорит о качественно настроенной модели. В последний трех треках на планшете показаны параметры чистых минеральных смесей (ГК и Vp смеси кварца, плагиоклаза и КПШ и плотность глин).

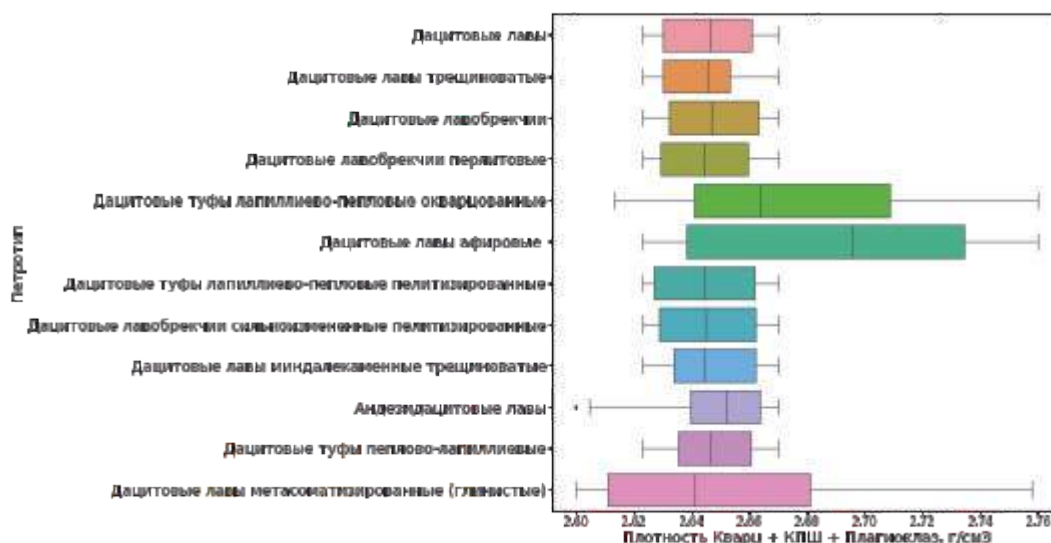
Параметры минеральных смесей при настройке модели показаны на Рис. 3. Каждое окно характеризует параметры

отдельного объема.

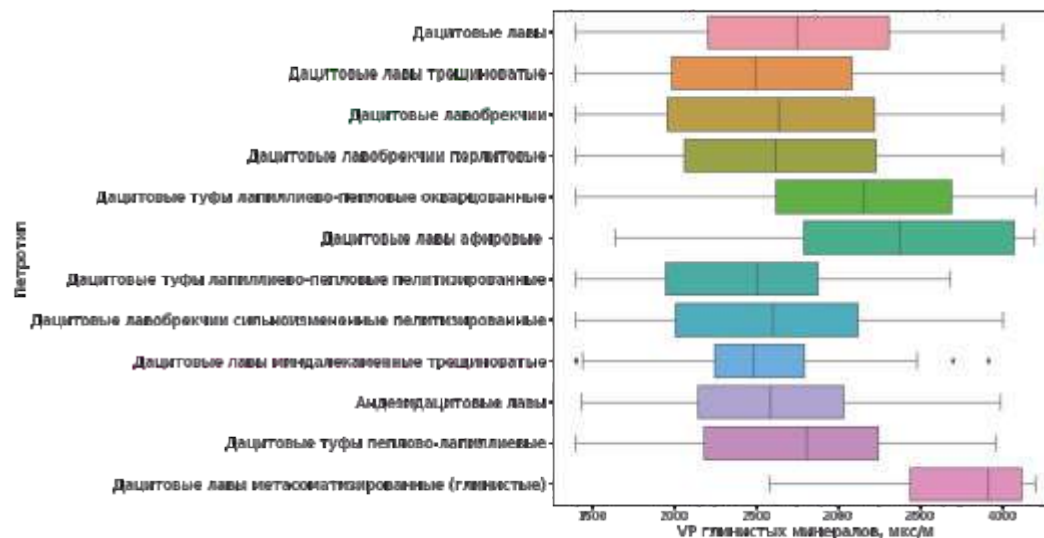
Корректность выполнения петрофизической инверсии, и в особенности расчет объема железистых минералов, играет важную роль при дальнейшей интерпретации. Так, повышенное содержание железа сильно занижает УЭС породы, в том числе и в нефтенасыщенных коллекторах, что необходимо учитывать при



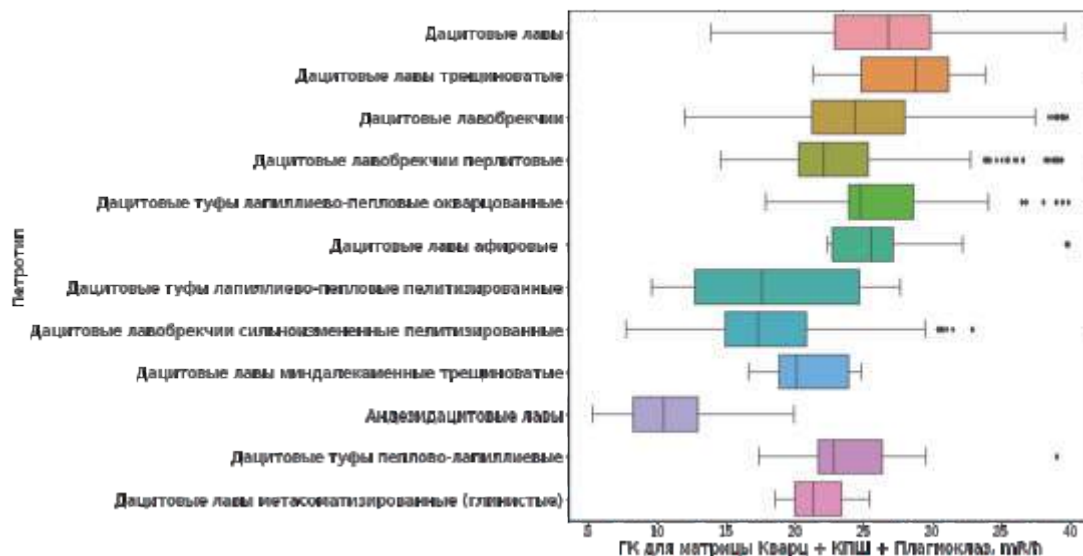
▲ Рис. 6. График box-plot для подгрупп петротипов по скорости пробега акустической волны в минеральной смеси Кварц+Плагиоклаз+КПШ.



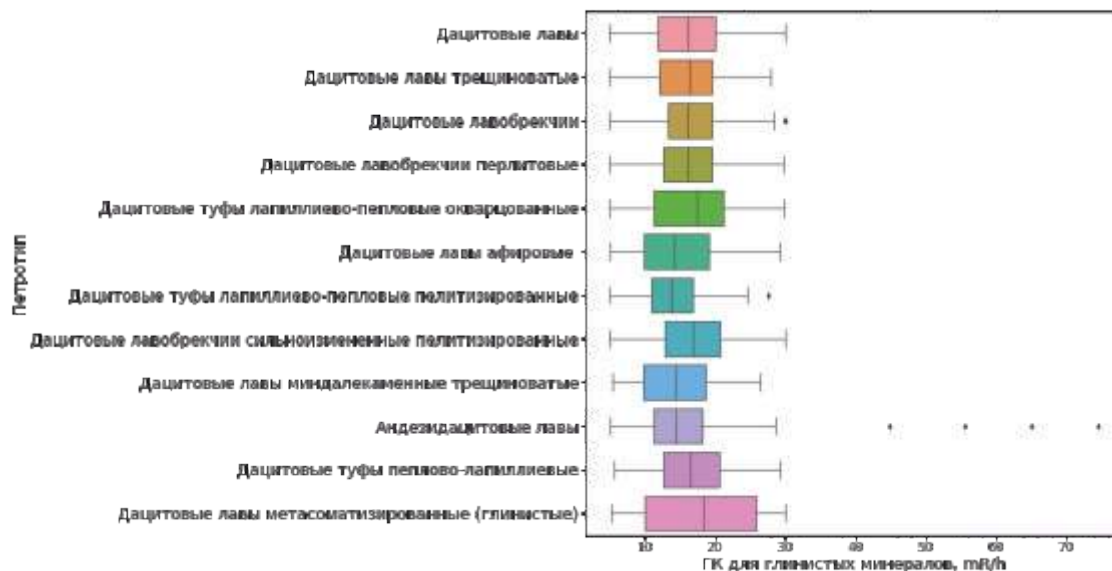
▲ Рис. 7. График box-plot для подгрупп петротипов по плотности минеральной смеси Кварц+Плагиоклаз+КПШ.



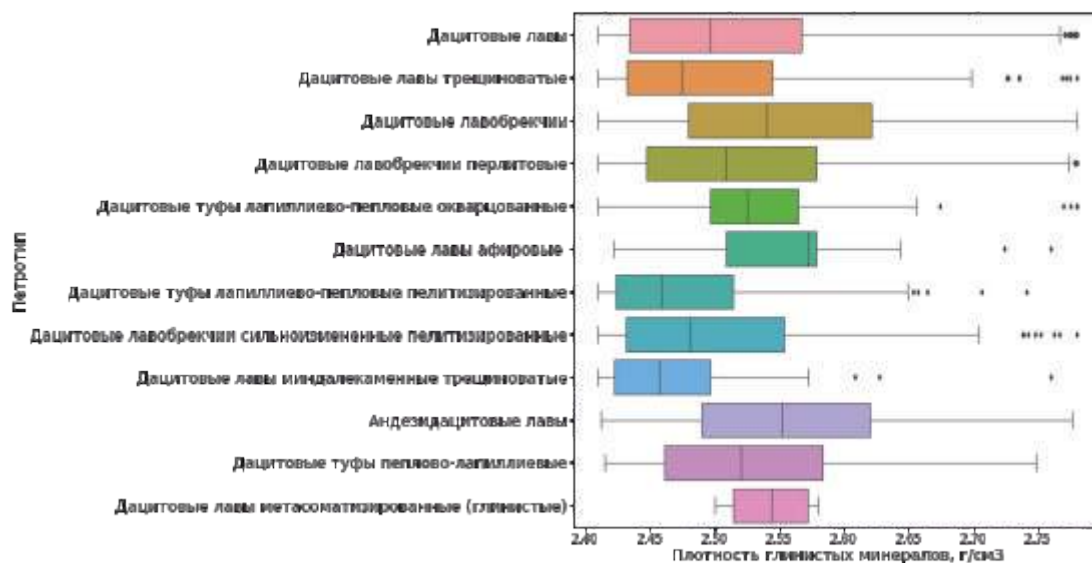
▲ Рис. 8. График box-plot для подгрупп петротипов по скорости пробега акустической волны для минеральной смеси Кварц+Плагиоклаз+КПШ.



▲ Рис. 9. График box-plot для подгрупп петротипов по ГК для минеральной смеси Кварц+Плагиоклаз+КПШ.



▲ Рис. 10. График box-plot для подгрупп петротипов по ГК для глинистых минералов.



▲ Рис. 11. График box-plot для подгрупп петротипов по плотности глинистых минералов.

определении характера насыщенности. Кроме того, недоучет железа сказывается на корректности определения пористости, которая будет сильно занижена при расчете пористости по показаниям плотностного каротажа. Более того, в интервалах повышенного содержания железа пористость из объемной модели проявляет себя значительно лучше, чем пористость по ЯМК, сравнение пористостей показано в треке 6 на Рисунке 1.

Используя результаты построения объемной модели (объемы и параметры чистых минералов) и кривые ГИС (АК, ГК, ГКп, W), оценивался потенциал каждого из параметров при прогнозе петротипов с помощью диаграмм box-plot. На Рисунках 4 - 11 представлен анализ box-plot для параметров скорости пробега продольной акустической волны и объемной плотности, а также для физических параметров чистых минералов. Тело свечи на диаграмме показывает распределение 75% данных, линия в теле свечи обозначает медиану распределения, «усы» диаграммы - максимальные и минимальные значения, точками обозначены выбросы. В представленном примере анализируются петротипы кислых вулканитов (риодациты и андезидациты в виде лав, лавобрекчий и туфов). По петрографическим признакам породы на изучаемом объекте можно разделить на 12 основных петротипов.

Выводы

Применение технологии «GS-Petrophysics» имеет хорошие перспективы для решения задачи построения объемной модели в сложных мультиминеральных отложениях, таких как магматические породы доюрского комплекса Западной Сибири. Применяемый метод позволяет избавиться от линейности решения матрицы уравнений, присущей стандартным подходам к построению объемной модели, и чувствителен к

изменению состава какой-либо компоненты.

Получаемые в результате применения технологии «GS-Petrophysics», кривые параметров чистых минералов могут быть использованы для уточнения минерального состава глинистых пород, что особенно актуально ввиду изменчивости их состава по разрезу. Более того, параметры чистых минералов могут быть использованы в качестве дополнительных входных данных при классификации пород по петротипам и при уточнении стратиграфических отбивок пластов.

Литература

1. Гольцман Ф. М. [1971] Статистические модели интерпретации. М., Наука, 327 с.
2. Еникеев Б. Н. [2014] Некоторые актуальные проблемы российской петрофизики и интерпретации. // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы. М., «ЕАГО Геомодель», 366 с.
3. Еникеев Б. Н. [2014] Построение нелинейных петрофизических уравнений и их использование при количественной интерпретации данных промысловой геофизики: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. М., 25 с.
4. Еникеев Б. Н., Кашик А. С., Чуринова И. М., Шпикалов Ю. А. [1980] Системный подход к задаче оценки свойств пласта по данным каротажа (модели и методы). М., ВНИИОЭНГ, 38 с.
5. Турчин В.Ф., Козлов В.П., Малкевич М. С. [1970] Использование методов математической статистики для решения некорректных задач. УФН, Т. 102. с. 345-386.
6. Халфин Л. А. [1972] Статистический подход к решению некорректных задач геофизики (содержание доклада, прочитанного по приглашению Оргкомитета на Международном симпозиуме «Математические основы интерпретации геофизических полей». Москва, май-июнь 1972) // Записки научных семинаров ЛОМИ. – Т. 79. – С. 67-81.
7. Элланский М. М. [2001] Петрофизические основы комплексной интерпретации данных геофизических исследований скважин (методическое пособие). М., Издательство ГЕРС, 229 с.

8. Элланский М. М. [1978] Петрофизические связи и комплексная интерпретация данных промысловой геофизики. М., Недра, 215 с.

9. Barricelli, Nils A. [1954] Esempi numerici di processi di evoluzione // Methodos. p. 45-68.

10. Kobrunov, A., and I. Priezzhev, [2016] Hybrid combination genetic algorithm and controlled gradient method to train a neural network: Geophysics, 81, no. 4, 1–9.

11. Mitchell W.K., Nelson R.J. [1988] A Practical Approach To Statistical Log Analysis // SPWLA 29th Annual Logging Symposium. 1988. June 5–8

12. Mitchell W.K., Nelson R.J. [1991] Statistical log analysis made practical: World Oil, Vol. 212, No. 6, 1991. p. 115-119.

13. Priezzhev, I., L. Shmaryan, and G. Bejarano, [2008] Non-linear multi trace seismic inversion using neural network and genetic algorithm - "Genetic Inversion". Extended Abstracts, Annual Meeting, EAGE, St Petersburg.

14. Rudenko V.J., Babakov I.V. and Priezzhev I.I. [2020] Application of Genetic Algorithms for Multimineral Modeling Based on the Principle of Petrophysical Inversion // European Association of Geoscientists & Engineers - Conference Proceedings, Data Science in Oil & Gas, Oct 2020, Volume 2020, p. 1-6

15. Rudenko V.J. Babakov I.V. and Priezzhev I.I. [2020] Application of Hybrid Combination Technology Genetic Algorithm Using Well-Log Data for Multimineral Modeling with Computing of Changes in Each Mineral Endpoint // European Association of Geoscientists & Engineers - Conference Proceedings, Geomodel 2020, Sep 2020, Volume 2020, p. 1-5

16. Rudenko V. Yu., Babakov I.V. and Priezzhev I.I. [2020] Application of stochastic model and genetic algorithms for multimineral modeling based on principle of petrophysical inversion. // Geofizika, 2020 no. 6, p. 18-26.

Подробнее об авторах



Руденко
Василий Юрьевич

Заведующий сектором интерпретации ГИС в ЗАО «МиМГО». Выпускник «КГТУ». Автор множества публикаций в научных журналах Казахстана и РФ. Является автором программного комплекса «GS-Petrophysics».



Гуренцов
Данила Евгеньевич

Геофизик 1-й категории в ЗАО «МиМГО». В 2017 г. окончил РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина.



Гаврилов
Сергей Сергеевич

Директор ЗАО «МиМГО». Выпускник кафедры литологии и морской геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. К.г.-м.н. Автор порядка 30 статей. Соавтор в 4 Государственных патентах на изобретения.



Смирнова
Мария Евгеньевна

Научный сотрудник ЗАО «МиМГО». Область интереса: седиментология, петрография, интерпретация ГИС, сейсмогеологическое моделирование.