

УДК 550.83.048

Я.И. Юсупов¹, Г.А. Калмыков²**ПЕТРОФИЗИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ГИС
ДЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КРАСНОЛЕНИНСКОГО СВОДА
(ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Геомеханика — комплексная дисциплина, которая охватывает вопросы геологии, геофизики, петрофизики, механики и т.д. Построение цифровой геомеханической модели начинается с этапа сбора и загрузки данных. Этот этап закладывает основы для всей последующей работы. Для геомеханического моделирования базой будущего проекта является специальный комплекс ГИС, который в обязательном порядке должен включать АКШ, ГГК-П, кавернометрию, ГК, БК. На примере одного из месторождений Красноленинского свода показано решение задачи восстановления интервальных времен пробега продольных и поперечных волн, а также объемной плотности на основе различных подходов.

Ключевые слова: геомеханическое моделирование, упруго-прочностные свойства, Красноленинский свод, Западная Сибирь.

Geomechanics is a complex discipline that covers issues of geology, geophysics, petrophysics, mechanics, etc. Building a digital geomechanical model begins with audit input data. This stage lays the foundations for all subsequent work. For geomechanical modeling, the basis of the future project is a special logging complex, which must include DTP, DTS, RHOV, CALI, GR. In this paper, on the example of one of the deposits of the Krasnoleninsky arch, the solution to the problem of reconstructing the P-, S-waves slowness, as well as bulk density, is shown based on various approaches.

Key words: geomechanical modeling, Krasnoleninsky arch, Western Siberia, elastic and strength properties.

Исходные данные. Для выполнения работ по коррекции и восстановлению кривых были задействованы 12 скважин разведочного и эксплуатационного назначения. Запись ГИС проводилась в основном с использованием аппаратуры иностранного комплекса. На этапах петрофизического анализа задействованы методм кавернометрии (КВ); естественной гамма активности (ГК); нейтронного каротажа (2ННКТ); бокового каротажа (БК); многозондового индукционного каротажа (ИКЗ); акустического каротажа широкополосной модификации (АКШ); гамма-гамма каротажа, включая литоплотностную модификацию (ГГК-П и ГГК-ПЛ).

Редактирование и предварительная обработка данных ГИС. Обработка данных ГИС и расчет синтетических кривых проведены в поточечном варианте с использованием программного комплекса «ГеоПоиск». Этапы обработки кривых ГИС включают: 1) загрузку в обрабатывающую систему; 2) оценку качества и нормализацию; 3) увязку и сшивку; 4) загрузку в систему данных

корреляции продуктивных пластов (разбивка на стратиграфические зоны), результатов обработки инклинометрии — кривых абсолютных значений глубины, результатов исследования керна; 5) приведение показаний 2ННКТ к единым значениям.

На предварительном этапе выполнялось сопоставление трендов кривых АК и данных ВСП по всей глубине скважин. Дополнительно было проведено сравнение и контроль значений АК и плотности с кернаграммами. Поскольку каротаж в скважинах записывался в основном в интервалах викуловских (ВК) и юрских (ЮК) отложений, сравнение кривых с кернаграммами выполнено отдельно для этих отложений. Корректированные по керну кривые в скважинах приняты за эталонные. Значения кривых остальных скважин контролировались путем сравнения гистограмм керна и эталонных кривых (рис. 1).

Корректировка данных акустического и плотностного методов. Показания методов ГИС в силу технологических причин и условий могут быть заметно искажены [Мейер, 1981]. Например, замеры

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; ООО «Литосфера», руководитель проектов по геомеханике; e-mail: yan_yusupov@bk.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, профессор; e-mail: gera64@mail.ru

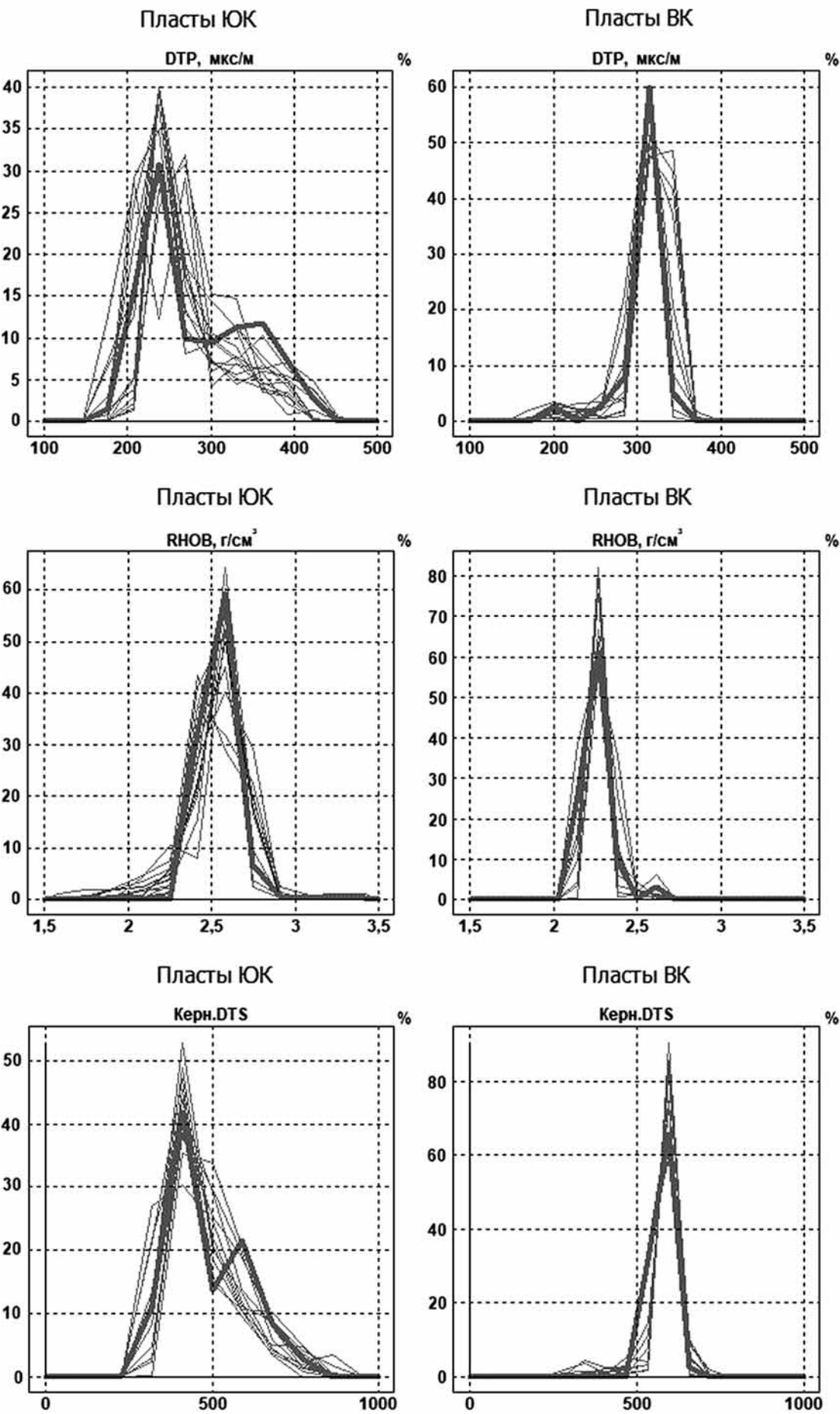


Рис. 1. Гистограммы каротажных и керновых значений АК и плотности в вукловских и юрских отложениях

ГГК-П искажаются за счет неплотного прижатия прибора к стенке скважины в интервалах каверн. Завышенные значения АК могут быть обусловлены пропуском первых вступлений, регистрируемых дальним приемником. Наличие Z-эффектов — искажение сигнала на границах каверн и неразмытой породы — часто отмечается на кривых АК. Все перечисленные искажающие факторы наблюдаются в разрезах исследуемых скважин.

Для геомеханического моделирования требуется непрерывная запись кривых АК и ГГК-П во всем интервале скважины. С целью создания непрерывной упругой характеристики геологического разреза в каждой скважине рассчитывались синтетические кривые этих методов, и на их основе проводилось исправление искаженных измеренных кривых либо их восстановление в случае отсутствия записи.

Наиболее распространенным и технически легко исполнимым является способ, основанный на коррекции искаженных участков записи путем их замены на значения АК или ГГКП, рассчитанные из показаний других методов, показания которых в меньшей степени подвержены влиянию скважинных условий.

На практике можно применять несколько подходов, позволяющих в той или иной степени скомпенсировать влияние неблагоприятных факторов на показания ГИС или восстановить недостающую информацию. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, обладает определенными ограничениями и не может быть заявлен как универсальный метод без значительного количества граничных условий.

Следует отметить, что разрез Краснотенинского свода представлен сложной системой геологических объектов, отличающихся по литологическим, физическим, фильтрационно-емкостным, упругим-прочностным и другим свойствам пород. Так, по разрезу скважин наблюдается сложное распределение тренда плотности пород, который необходимо учитывать при настройке связей синтетических кривых.

Расчет синтетических кривых интервального времени продольной волны. Имеющийся комплекс ГИС в скважинах позволяет рассчитать синтетические кривые интервального времени продольной волны ДТР как минимум по двум методам — электрическому и нейтронному. Наибольшей популярностью пользуются способы пересчета с помощью универсальных эмпирических уравнений, адаптированных под конкретные геолого-геофизические условия, например, уравнение Фауста [Faust, 1953], связывающее показания электрических методов с интервальным временем пробега продольных волн:

$$\Delta T = \frac{C}{RT \cdot \text{Depth}}, \quad (1)$$

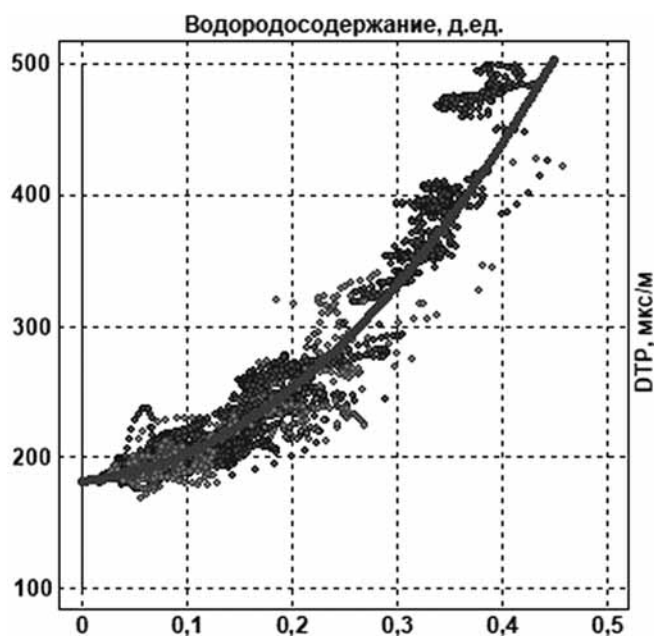


Рис. 2. Зависимость интервального времени от водородосодержания в интервалах викуловских и вышележащих отложений

где $C=513,3$ — константа, RT — истинное удельное электрическое сопротивление породы, Depth — глубина замера (фут).

Недостаток применения уравнения Фауста для этой работы заключается в его низкой эффективности использования в интервале баженовской свиты. Получаемая синтетическая кривая интервального времени в указанном интервале имеет обратную характеристику. При этом кривая DTSINT в отложениях баженовской свиты вместо правомочного увеличения интервального времени, наоборот, уменьшается. Следует отметить, что в формуле Фауста (1) предусмотрен учет настраиваемой связи с изменением глубины. Таким образом, по уравнению возможно одновременно учитывать уплотнение пород с глубиной, однако положительный результат может быть при «нормальном» и равномерном изменении уплотнения пород. Кроме того, недостаток заключается в том, что для синтеза кривых АК по методу Фауста используется метод ИК. Использование УЭС по ИК может быть достаточно эффективным напротив мощных однородных пачек пород. В случае «листоватости» кероген-кремнисто-глинистых разностей баженовской свиты метод ИК не эффективен из-за низкой разрешающей вертикальной способности, в результате которой синтетические кривые ДТР получаются более сглаженными, чем реальные записанные кривые. Таким образом, для синтеза кривых интервального времени в баженовской свите электрические методы не применялись.

На основании вышеизложенного для синтеза кривых наиболее эффективным оказался комплексный подход с применением индивидуальных корреляционных связей АК и данных 2ННКТ,

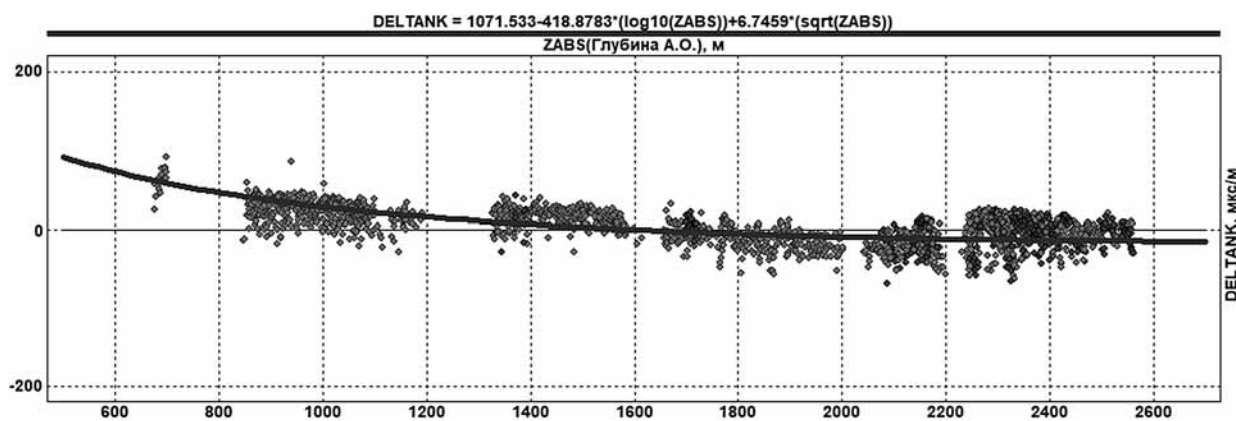


Рис. 3. Взаимосвязь между величиной ошибки (DELTANK) и глубиной (ZABS в А.О.)

выполненный в несколько этапов. На первом этапе настраивалась общая связь между АК и 2ННКТ (рис. 2) в достаточно «стабильных», с точки зрения распределения закона уплотнения, интервалов викуловских и вышележащих отложений. Получаемая синтетическая кривая (DTSINTNK0) принята как первое приближение по причине того, что не предусматривает ни характер уплотнения, ни литологические особенности пород других интервалов разреза.

Уравнение связи имеет следующий вид:

$$DTSINTK0 = 181,684 + 67,1084 \text{ TNPH} + 1444,4143 \text{ TNPH}^2 \quad (R=0,96), \tag{2}$$

где TNPH — водородосодержание пород по НК.

На следующем этапе проводилась оценка ошибки, возникающей из-за неучета закона уплотнения пород при расчете первого приближения синтетической кривой интервального времени. Сама ошибка в виде дискретной кривой рассчитывается как разница между DTSINTNK0 и оригинальной кривой интервального времени ΔT :

$$\Delta NK = DTnorm - DTSINTNK0, \tag{3}$$

где $DTnorm$ — нормированная оригинальная кривая АК.

Непосредственный прогноз ошибки (рис. 3) в каждой скважине выполнялся путем ее расчета по сложной корреляционной связи $DEL\text{TANK}=f(ZABS - \text{глубина в А.О.})$.

Уравнение связи имеет вид:

$$\Delta NK = 1081,533 - 418,8783 \cdot (\log_{10}(ZABC)) + 6,8459 \cdot \sqrt{ZABC} \tag{4}$$

Учет закона уплотнения пород в каждой скважине осуществлялся путем вычитания синтетической кривой (в зависимости от знака величины ошибки) из значений первого приближения.

$$DTSINTK1 = (1071,533 - 418,8783 \cdot (\log_{10}(ZABC)) + 6,7459 \cdot \sqrt{ZABC}) + DTSINTK0, \tag{5}$$

Финальный расчет синтетической кривой интервального времени (DTSINTNK) выполнен с учетом литологических особенностей каждого пласта путем индивидуальной настройки связей $DTP=f(DTSINTNK1)$.

Таблица 1

Эмпирические уравнения расчета синтетической кривой интервального времени продольной волны по нейтронному методу DTSINTNK

Номер	Интервалы	Уравнения
1	викуловская свита	$DTSINTNK = 485,011 - 57883,5705 \cdot (1/(DTSINTNK1))$
2	баженовская свита, пачка ЮК0-1	$DTSINTNK = 301,9 + 0,2352 \cdot (DTSINTNK1)$
3	баженовская свита пачка ЮК0-2	$DTSINTNK = 159,8 + 0,5799 \cdot DTSINTNK1$
4	пласт ЮК1	$DTSINTNK = 89,26 + 0,5854 \cdot (DTSINTNK1)$
5	пласт ЮК2	$DTSINTNK = 92,46 + 0,6804 \cdot (DTSINTNK1)$
6	пласт ЮК3	$DTSINTNK = 54,71 + 0,8564 \cdot (DTSINTNK1)$
7	пласт ЮК4	$DTSINTNK = 12,3 + 1,017 \cdot (DTSINTNK1)$
8	пласт ЮК5	$DTSINTNK = 3,46 + 1,031 \cdot (DTSINTNK1)$
9	пласт ЮК6	$DTSINTNK = 119,6 + 0,5267 \cdot (DTSINTNK1)$
10	пласты ЮК7-10	$DTSINTNK = 47,75 + 0,8125 \cdot (DTSINTNK1)$
11	пласт ДЮК	$DTSINTNK = 46,06 + 0,7103 \cdot (DTSINTNK1)$

Следует отметить, что в результате отличия геофизических параметров интервал баженовской свиты разделен на две пачки. Верхняя пачка имеет повышенные плотность и интервальное время, низкие значения УЭС и высокую радиоактивность, в отличие от нижней пачки.

Ниже приведены уравнения зависимостей для каждого пласта (табл. 1).

Контроль значений синтетических кривых DTSINTNK реализован путем сопоставления их с записанными значениями DTP (рис. 4). Для сравнения использованы значения против ровных стенок скважин DS-DN≈0,005м.

Расчет синтетических кривых плотностного метода ГГКП. Использование эмпирических уравнений Гарднера [Мейер, 1981] для восстановления кривой объемной плотности — способ, достаточно распространенный в практике. Уравнение имеет следующий вид:

$$\rho = A(V_p)^b,$$

(6)

где ρ — объемная плотность, V_p — скорость продольных волн, A и b — константы.

Предпосылка применения этого уравнения заключается в наличии связи между скоростью продольной волны и объемной плотностью. Однако необходимо отметить, что при определении плотности по уравнению никак не учитывается влияние изменения литологического состава. Это ограничение становится критичным при отсутствии значимой корреляции между скоростью и плотностью или служит более неблагоприятным обстоятельством, — когда уменьшение скорости происходит при увеличении плотности. Предварительное применения этого уравнения на материалах скважин изучаемого месторождения показало, что использование эмпирических уравнений для

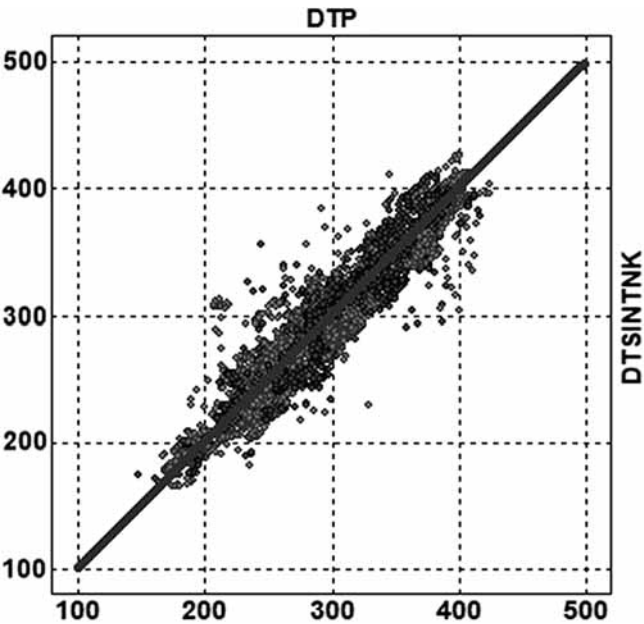


Рис. 4. Корреляция между синтетическими и записанными кривыми АК

расчета кривых ГГК-П оказалось неприемлемым, и при расчете необходимо учитывать влияния литологического состава, что привело к дополнительному анализу данных с целью поиска индивидуальных зависимостей для отдельных интервалов разреза (рис. 5). Ниже приведены уравнения зависимостей для каждой группы пластов (табл. 2).

Расчет синтетических кривых интервального времени поперечной волны $\Delta T(DTS)$. Оптимальным решением для расчета кривых интервального времени поперечной волны оказалось использование связи $DTS=f(DTP)$ и многомерной связи с привлечением интервального времени продольной волны и плотности. Все связи построены по значениям кривых, скорректированных за каверны. Ниже

Уравнения расчета синтетической кривой ГГКП

Таблица 2

Номер	Интервалы	Уравнения
1	вышележащие отложения	$RHOBSINT= 3,301 - 0,0686 \cdot (DTPCOR)^{0,5}+0,0002 \cdot ZABS$
2	викуловская свита	$RHOBSINT= -0,393 - 0,0534 \cdot (DTPCOR)^{0,5}+1,1620 \cdot \log_{10}(ZABS)$
3	баженовская свита (ЮК0-1)	$RHOBSINT=3,238 - 297,4937 \cdot (1/(DTPCOR))$
4	баженовская и абалакская свита (ЮК0-2 и ЮК1)	$RHOBSINT=1,470+293,1270 \cdot (1/(DTPCOR))$
5	юрские отложения (ЮК2 — ЮК6)	$RHOBSINT=3,739 - 0,0050 \cdot (DTPCOR)$
6	пласты ЮК7-ДЮК	$RHOBSINT=3,352 - 0,0036 \cdot (DTPCOR)$

Уравнения расчета синтетической кривой DTS

Таблица 3

Номер	Интервалы	Уравнения
1	вышележащие отложения	$DTSSINT=10^{(2,287+0,0016 \cdot (DTPCOR))}$
2	викуловская свита	$DTSSINT=10^{(2,037+0,0016 \cdot (DTPCOR)+0,6621 \cdot (\log_{10}(RHOBCOR)))}$
3	баженовская свита	$DTSSINT= 10^{(2,277+0,0015 \cdot (DTPCOR))}$
4	пласты ЮК1-ДЮК	$DTSSINT=10^{(1,853+0,0020 \cdot (DTPCOR)+0,7301 \cdot (\log_{10}(RHOBCOR)))}$

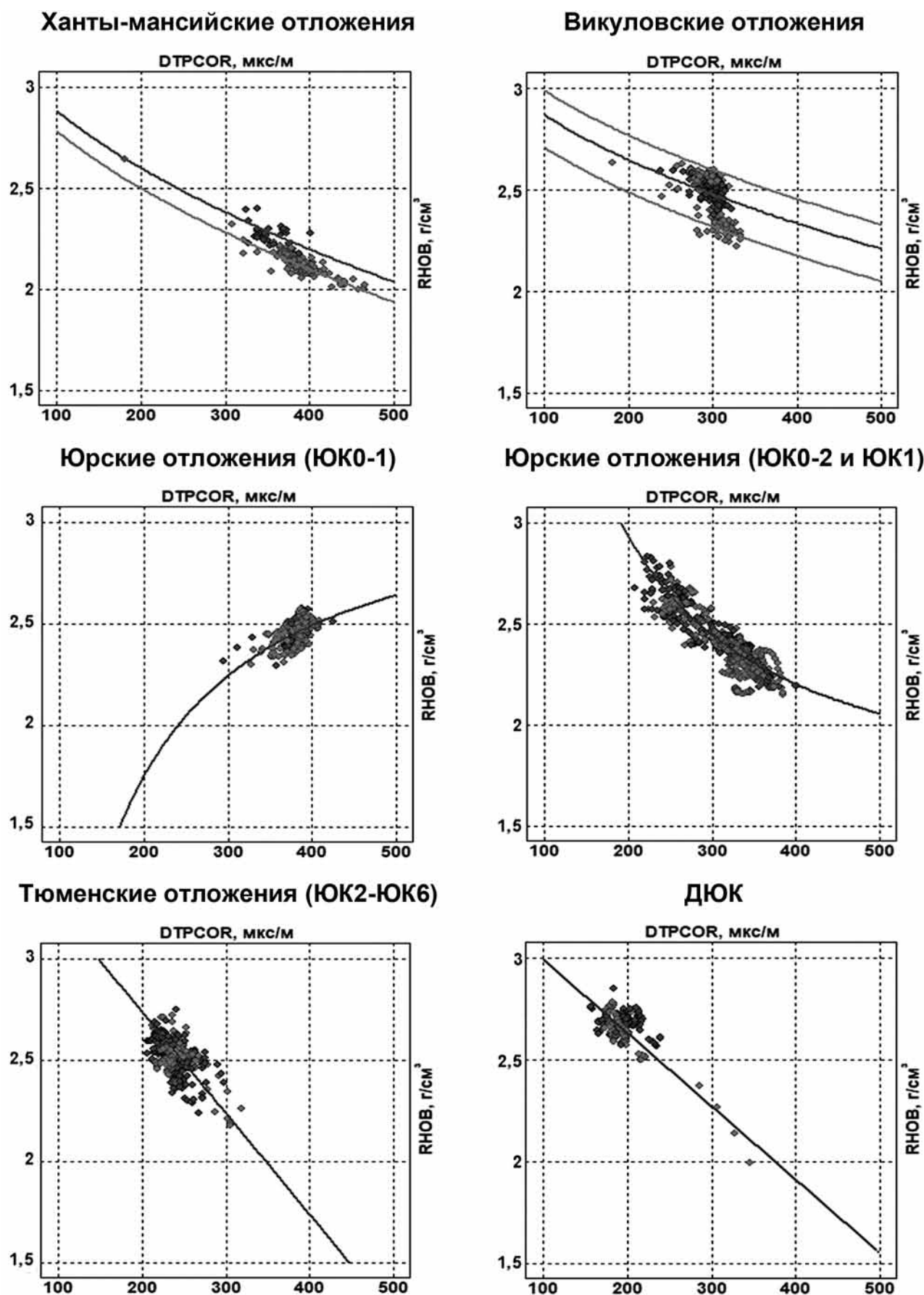


Рис. 5. Корреляция между интервальным временем пробега продольных волн и плотностью

приведены уравнения зависимостей для каждой группы пластов (табл. 3).

Значения синтетических кривых DTSSINT контролировались на основании сопоставления их с записанными значениями DTS (рис. 6). Для сравнения использованы значения против ровных стенок скважин DS-DN $\approx$ 0,005 м.

Заключение. Разрез Красноленинского свода представлен сложной системой геологических объектов, отличающихся по литологическим, фильтрационно-емкостным, упругим-прочностным и другим свойствам. При построении геомеханической модели для этого разреза необходимо учитывать индивидуальные особенности каждого объекта. От корректности геомеханической модели зависит правильный подбор безопасной плотности бурового раствора, дизайн трещин гидроразрыва, определение зон неустойчивости и т.д. В основе моделирования лежит специальный комплекс ГИС (АКШ, кавернометрия и т.д.), который записывается не во всех скважинах на месторождении, а если и записывается, то не по всему разрезу. В рамках нашей работы разработана максимально адаптированная к имеющимся геолого-геофизическим условиям Красноленинского свода методика восстановления кривых АК и ГГК-П, которая опробована на 12 скважинах с отбором керна и записью АКШ в продуктивной части. Новая методика включает несколько итераций: 1) обязательную сшивку, нормировку и корректировку по керну кривых ГИС; 2) синтезирование кривых плотности, интервального времени пробега по-

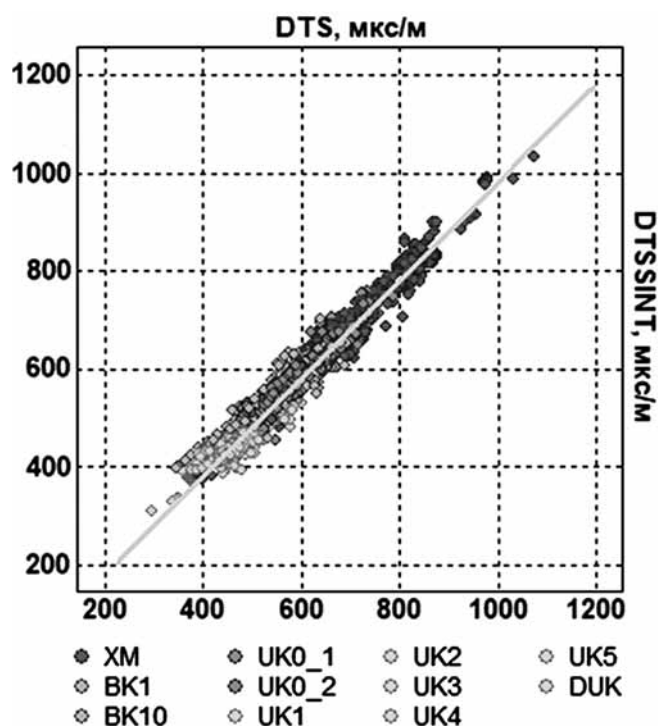


Рис. 6. Корреляция между синтетическим и записанным интервальным временем пробега поперечных волн

дольных и поперечных волн с учетом уплотнения отдельно по каждому объекту разработки (ДЮК, тюменская свита, бажено-абалакский комплекс, фроловская и викуловская свиты) и вмещающим породам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Мейер В.А. Геофизические исследования в скважинах: Учебное пособие. Л.: Издательство ЛГУ, 1981.

Faust L. Y. A velocity function including lithologic variation // Geophysics. 1953. Vol. 18. P. 271–288.

Gardner G.H.F., Gardner L.W. Formation velocity and density // The diagnostic basics for stratigraphic traps // Geophysics. 1974. Vol. 39, N 6.

Поступила в редакцию 00.00.2020

Поступила с доработки 00.00.2020

Принята к публикации 00.00.2020