УДК 550.8.053

ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАННЫХ В КАРБОНАТНОМ РАЗРЕЗЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПОПЛАСТОВОГО АНАЛИЗА

FEATURES OF DATA RECOVERY IN THE CARBONATE SECTION USING THE LAYER-BY-LAYER ANALYSIS TECHNOLOGY

Денисов Владислав Сергеевич
студент кафедры геофизики,
Санкт-Петербургский горный университет
vladdenisoff2001@gmail.com

Denisov VladislavSergeevich
Student of the Department of Geophysics,
St. Petersburg Mining University
vladdenisoff2001@gmail.com

Аннотация. Данная работа посвящена анализу возможностей восстановления данных акустического каротажа (АК) на основе уравнения Заляева в попластовом варианте с учетом геологического строения исследуемого месторождения. Восстановление данных методов каротажа на сегодняшний день является весьма актуальной и востребованной задачей, позволяющее получить дополнительную информацию в условиях ограниченных данных. Главная особенность предлагаемого подхода сводится к выполнению послойного подбора уточняющих коэффициентов для получения наиболее достоверного уравнения восстановления данных, учитывающих геологию.

Ключевые слова: данных каротажа, акустический каротаж, попластовый анализ, уравнение Н.З. Заляева.

Annotation. This work is devoted analysis possibilities of recovering acoustic logging (AK) data based on the Zalyaev equation in a layer-by-layer version, taking into account the geological structure of the studied field. Restoration of these logging methods today is a very relevant and demanded task, which makes it possible to obtain additional information in conditions of limited data. The main feature of the proposed approach is to perform a layer-by-layer selection of refinement coefficients to obtain the most reliable data recovery equation that takes into account geology.

Keywords: logging data, acoustic logging, reservoir analysis, N.Z. Zalyaev equation.

Введение

При проведении геологоразведочных изысканий с целью изучения геологического строения месторождений полезных ископаемых, зачастую, используется комплекс геофизических методов: сейсморазведка (МОВ-ОГТ, МПВ-ОСТ, и т.д.), бурение (отбор керна), геофизические исследования скважин (ГИС) (акустический, нейтронный, гамма и другие виды каротажа) и другие геофизические методы. В дальнейшем при обработке и интерпретации геофизических результатов происходит их комплексирование и сопоставление, и составляется единая физико-геологическая модель, на которой отражаются основные результаты интерпретации.

Популярным сочетанием методов является сейсморазведка и ГИС, так как в обоих методах изучается скорость в горной породе (в ГИС проводится акустический каротаж (АК)). Для высококачественной привязки сведений сейсморазведки к геологическому разрезу, а также с целью их дальнейшей интерпретации, требуется наличие акустического и плотностного каротажа в большинстве скважин исследуемого участка. Однако сейсморазведка часто проводится на участках, где ГИС проводились давно и данные методы либо не проводились (полностью или частично), либо они низкокачественные и не могут быть использованы в обработке и интерпретации. Соответственно необходимо применять технологию восстановления недостающих данных каротажа используя известные или, выведенные для каждого случая, зависимостис другими методами каротажа или на основе уравнений многомерной регрессии.

Методы восстановления данных ГИС

В настоящее время известны и применяются разные подходы к восстановлению физических свойств разреза, в частности, акустических свойств. Это методы Фауста, Гарднера, Заляева и др. Однако в условиях ограниченного комплекса ГИС, а также сложного строения месторождений их использование либо весьма ограничено, либо вовсе не представляется возможным.

Модель Заляева предложена в 1981 г. и основана на использовании нейтронного каротажа (НК) с подбором нормировочных коэффициентов m и k в каждой конкретной ситуации и выражается формулой:

$$DT_p = -\ln(NK - k) + m, \quad (1)$$

здесь DT_p – интервальное время, NK – показания нейтронного каротажа.

Для построения зависимости выбирается скважина с хорошим качеством записи методов АК и НК [1, 2].

Модель Фауста предложена в 1951 г. и заключается в переводе одного из методов кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) в единицы АК DT_p путем подбора нормировочных коэффициентов a и b:

$$DT_p = \frac{a}{(Depth \cdot R_t)^b}, \quad (2.1)$$

здесь Depth – глубина, R_t – сопротивление породы.

Основным принципом подбора коэффициентов является построение зависимости $DT_p(R_t)$ и $DT_p(NK)$ с выводом на график линейного тренда и уравнения регрессии. Для первой зависимости применялась множественная регрессия. В связи с этим исходное уравнение представляется в виде:

$$\ln DT_p = b_0 - b_1 \cdot \ln Depth - b_2 \cdot \ln R_t. \quad (2.2)$$

Метод компонент основан на известной величине пористости ($k_{п\ НК}$) и времени пробега в скелете, в жидкости и в глине:

$$\Delta T = k_{пНК} * \Delta T_ж + k_{глГК} * \Delta T_{гл} + (1 - k_{пНК} - k_{глГК}) * \Delta T_{ск}, \quad (3)$$

здесь $k_{пНК}$ – коэффициент пористости, $k_{глГК}$ – коэффициент глинистости [3, 4].

Модель Смита предложена в 1968 г. и выражается формулой, связывающей интервальное время DT_p с сопротивлением горных пород (R_t). Коэффициенты C и n являются нормировочными и подбираются в зависимости от геологических особенностей месторождения:

$$DT_p = C * R_t^n. \quad (4)$$

Использование нейронных сетей предполагает некоторое обучение нейронов образам геофизических диаграмм [5].

В данной работе рассмотрен способ восстановления АК при помощи уравнения Заляева.

Описание технологии восстановления АК при помощи уравнения Заляева

Для того чтобы восстановить данные АК в скважинах где данный вид каротажа либо не проводился (полностью или частично), либо имеет низкое качество, надо сначала подобрать коэффициенты в уравнении (1). Для этого выберем скважину или группу скважин, в которых присутствуют как АК, так и НКТ (нейтронный каротаж по тепловым нейтронам). Это делается для того, чтобы осуществить степень достоверности данного способа восстановления данных ГИС.

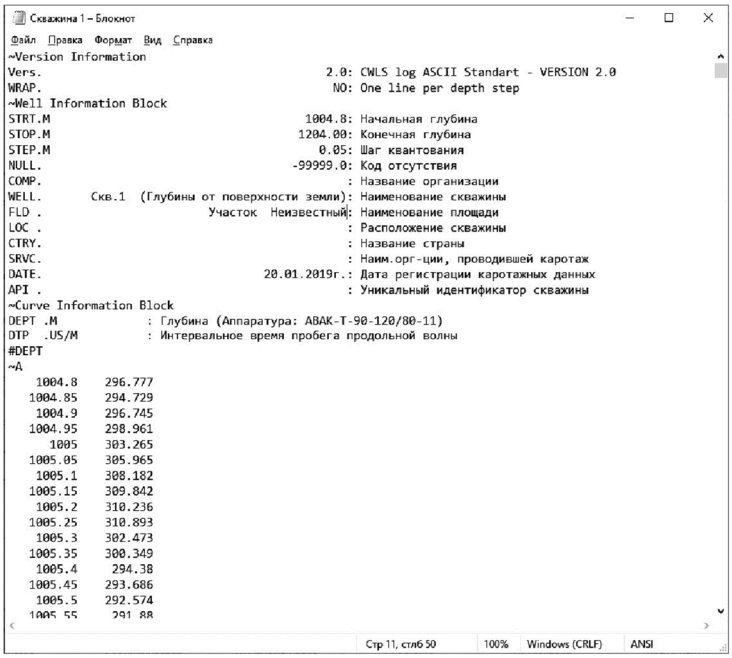
Данные файлы были получены в 2019 году по одному из изучаемых месторождений Калининградской области. На основе анализа представленных данных, была произведена оценка и уточнение геологического строения, выделены основные геологические горизонты и определены мощности и создана таблица геолого-геофизической информации [6]. Анализируя данные по месторождению, обнаружилось, что данных по акустическому каротажу в скважинах весьма мало, что, в свою очередь, создает предпосылки для попытки восстановить их, используя представленный ниже алгоритм.

Ход расчетов

Для простоты расчетов в работе, осуществления вычислений и построений используется пакет MicrosoftOffice. В него перенесем из первоначального файла глубину, данные АК и НК. Для этого сначала надо конвертировать первоначальные файлы – LAS, в воспринимаемый формат для Excel «TXT». Получаем исходные файл (рис. 1), на основе которых в дальнейшем реализуются все расчеты, рассматриваемые в представленной работе.

Далее, данные переносятся из файла в Excel, где структурируются для дальнейших расчетов. Для этого во вкладке «Данные» выберем пункт «Из текста», в открывшемся окне выбираем конвертированный файл, далее в открывшемся окне найдем строку, с которой начинаются данные, введем эту значение в соответствующее окно «Начать импорт со строки». В итоге получается массив данных АК и НКТ, с которым и будут производиться дальнейшие действия.

В любом соседнем столбце вводим при помощи функций Excel уравнение Заляева, при этом за нормировочные коэффициенты будут отвечать отдельные ячейки – это делается для того, чтобы было более удобно подбирать их. В итоге получаем формулу – «Y = –90 * LN(C2 – H2) + G2». Далее строим график по оси x которого возьмем показания АК, по оси y глубину. Для удобства сделаем обратный порядок оси y. Далее перебором коэффициентов m и k будем пытаться максимально сопоставить синтезированный график с исходным графиком АК. При этом стоит учитывать, что коэффициент k отвечает за сжатие (если он отрицательный) или растяжение (если он положительный), а коэффициент m отвечает за положение графика относительно оси x – с увеличением коэффициента график передвигается по оси в положительном направлении. В итоге получаем два графика (рис. 2). В примере коэффициенты получились – m = 561,24; k = –23,75.



Скважина 1 – Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

```
~Version Information
Vers.                                          2.0: CWLS log ASCII Standart - VERSION 2.0
WRAP.                                           NO: One line per depth step
~Well Information Block
STRT.M                                      1004.8: Начальная глубина
STOP.M                                      1204.00: Конечная глубина
STEP.M                                         0.05: Шаг квантования
NULL.                                      -99999.0: Код отсутствия
COMP.                                             : Название организации
WELL.       Скв.1  (Глубины от поверхности земли): Наименование скважины
FLD .                        Участок  Неизвестный: Наименование площади
LOC .                                             : Расположение скважины
CTRY.                                             : Название страны
SRVC.                                             : Наим.орг-ции, проводившей каротаж
DATE.                                20.01.2019г.: Дата регистрации каротажных данных
API .                                             : Уникальный идентификатор скважины
~Curve Information Block
DEPT .M             : Глубина (Аппаратура: АВАК-Т-90-120/80-11)
DTP  .US/M          : Интервальное время пробега продольной волны
#DEPT
~A
    1004.8    296.777
   1004.85    294.729
    1004.9    296.745
   1004.95    298.961
      1005    303.265
   1005.05    305.965
    1005.1    308.182
   1005.15    309.842
    1005.2    310.236
   1005.25    310.893
    1005.3    302.473
   1005.35    300.349
    1005.4     294.38
   1005.45    293.686
    1005.5    292.574
   1005.55     291.88
```

Стр 11, стлб 50 | 100% | Windows (CRLF) | ANSI

Рисунок 1 – Конвертированный файл из формата LAS в формат TXT

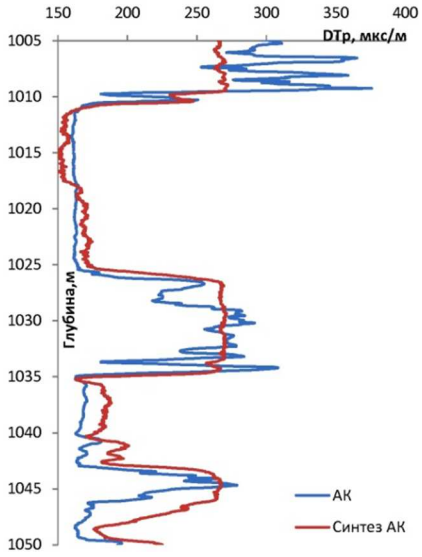


Рисунок 2 – График АК и синтеза АК

Далее для проверки достоверности построим график корреляционной зависимости синтезированных DT_p, полученных по уравнению Заляева, от DT_p по данным ГИС. График представлен на рисунке 3.

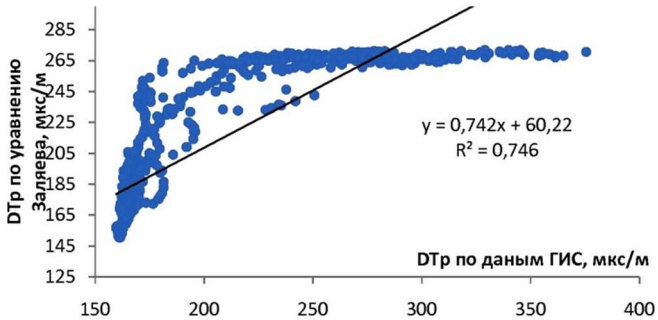


Рисунок 3 – График зависимости синтезированных DT_p по уравнению Заляева от DT_p по данным ГИС, мкс/м

Коэффициент достоверности представленных графиковR2 должен стремится к 1, но, как видно по графику на рисунке 3, R^2 = 0,7469, что является достаточно достоверно, но всё же можно сделать данный коэффициент более близким к 1.

Попластовая привязка ГИС к горным породам (попластовый анализ)

Для того, чтобы коэффициент R^2 был как можно ближе к 1, применим попластовый анализ – привяжем данные ГИС к конкретным горным породам. Это можно сделать несколькими способами:

1. Используя стратиграфическую колонку, выделяем пласты на графиках и для каждого отдельно подбираем коэффициенты для уравнения;
2. В случаи отсутствия колонки, выделим по комплексу других видов ГИС (рис. 4) – НК и ГК, далее по справочным материалам сопоставляем показания каротажей и значения для конкретных горных пород.

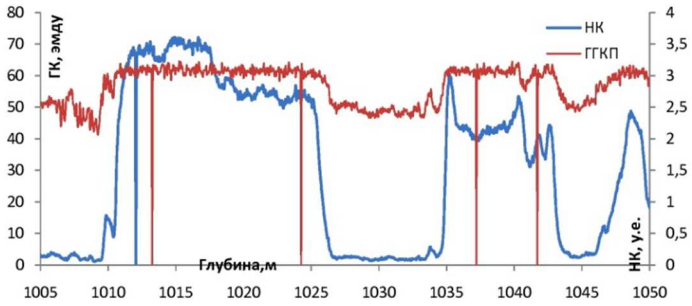


Рисунок 4 – Сопоставление НК и ГК

По графикам на рисунке 4 можно выделить 7 интервалов:

1. 1005–1010 м (глина аргиллитоподоная);
2. 1010–1025 м (ангидрит);
3. 1025–1030 м (мергель плотный);
4. 1030–1035 м (доломит);
5. 1035–1042 м (ангидрит);
6. 1042–1046 м (доломит с включениями глины);
7. 1046–1050 м (ангидрит).

Эти интервалы сопоставляем со стратиграфической колонкой, представленной на рисунке 5.

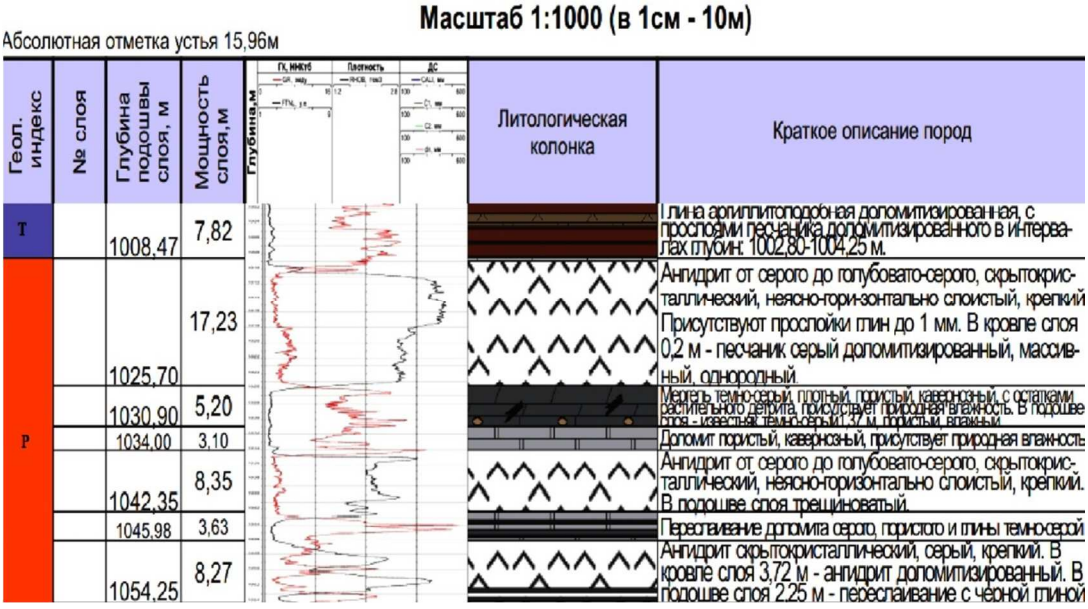


Рисунок 5 – Фрагмент стратиграфической колонки по скважине 1

Как видно, интервалы, которые были выделены по данным НК и ГК, довольно таки точно совпадают со стратиграфической колонкой, следовательно, можно говорить о том, что выделить слои без стратиграфической колонки можно хорошей точностью.

Для более качественного восстановления АК возьмем данные о мощностях со стратиграфической колонки.

Дальнейший алгоритм полностью совпадает с вышеописанным алгоритмом. Приведу результаты послойного анализа (табл. 1):

Таблица 1 – Значения нормировочных коэффициентов для уравнения Заляева

№ пп	Интервалы, м	m	к
1	1004,8–1008,5	426,85	–0,75
2	1008,5–1025,7	619,74	–97,86
3	1025,7–1030,9	306,74	0,27
4	1030,9–1034	351,54	–0,57
5	1034–1042,35	598,41	–74,57
6	1042,35–1046	314,45	1,02
7	1046–1050	639,86	–149,74

Далее для проверки достоверности построим график зависимости синтезированных DT_p по уравнению Заляева от DT_p по данным ГИС. График представлен на рисунке 7.

Коэффициент достоверности R^2 получился ближе к 1 (R^2 = 0,9051) нежели без попластового анализа, это говорит о том, что применение данного метода даёт более достоверные сведения при восстановлении АК.

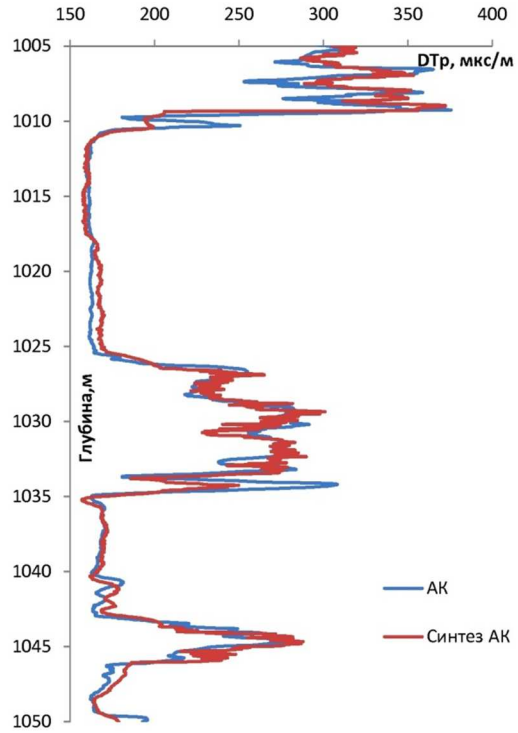


Рисунок 6 – График АК и синтеза АК при помощи послойного анализа

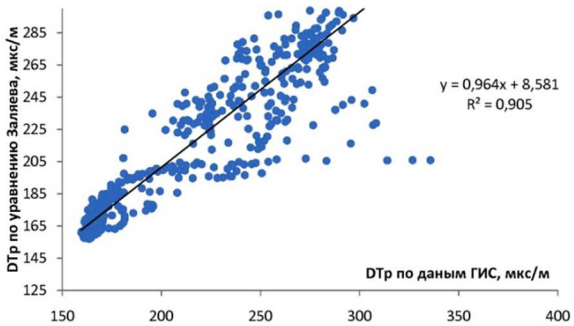


Рисунок 7 – График зависимости синтезированных DT_p по уравнению Заляева от DT_p по данным ГИС, мкс/м

Выведенные коэффициенты в результате попластового анализа можно применять в соседних скважинах месторождения при наличии в них записи нейтронного метода каротажа и возможности проследить те же комплексы горных пород, что и в эталонных скважинах. В противном случаем восстановление данных АК будет иметь большую погрешность и его применение для дальнейших расчетов будет нецелесообразным.

Заключение

В результате анализа геофизических данных по месторождению Калининградской области была предложена методика восстановления данных акустического каротажа с применением уравнения Заляева ввиду наличия в большинстве скважин записи нейтронного метода каротажа по тепловым нейтронам.

Однако, следует иметь ввиду, что данное уравнение «работает» в том случае, когда есть возможность выделить в разрезе скважины отдельные литологические типы горных пород и проводить подбор основных коэффициентов в попластовом режиме. Общий анализ данных по всей скважине дает «смазанные» результаты с невысоким коэффициентов достоверности и делает невозможным дальнейшее использование данных для последующей интерпретации.

Наличие с изучаемом разрезе карбонатных пород, имеющих контрастные свойства позволило четко выделить эти породы по комплексу методов ГК и НКТ, а различие в упругих свойствах, позволило более четко отразить возможности использования уравнения Заляева в попластовом варианте.

Но следует отметить и недостаток метода: даже при коэффициенте достоверности, стремящимся к 1 (0,9) на графиках видны участки с максимальным расхождением кривых. В данных участках скважины предполагается наличие в этих областях зон трещиноватости, вследствие чего возникают резкие перепады значений скоростей и снижается качество получаемых результатов.

Литература:

1. Заляев Н.З. Методика автоматизированной интерпретации геофизических исследований скважин. – Мн. : Университетское, 1990. – 144 с.

2. Заляев Н.З. Комплексная интерпретация геофизических параметров функциональными преобразованиями с помощью ЭВМ. – Минск : Изд-во БелНИГРИ, 1981. – 150 с.

3. Faust L.Y. A Velocity Function Including Lithologic Variation // Geophysics. – 1951. – Vol. 18. – P. 271–288.

4. Gardner G.H.F. Formation velocity and density // The diagnostic basics for stratigraphic traps : Geophysics, 1974. – Vol. 39. – P. 770–780.

5. Восстановление акустических свойств горных пород по данным геофизических исследований скважин / Г.Р. Вахитова [и др.] // Материалы 12-ой научно-практической конференции и выставки EAGE «Инженерная геофизика 2016». – Анапа, 2016. – 25–29 апреля.

6. Данильева Н.А., Данильев С.М., Большакова Н.В. Выделение глубокозалегающего рассольного водоносного горизонта в породах хемогенного разреза по данным геофизических исследований скважин и 2D-сейсморазведки // Записки горного института. – 2021. – Т. 250. – № 4. – С. 501–511.

References:

1. Zalyaev N.Z. Methodology of automated interpretation of geophysical studies of wells. – Mn. :Universitetskoe, 1990. – 144 p.

2. Zalyaev N.Z. Complex interpretation of geophysical parameters by functional transformations using a computer. – Minsk :BelNIGRI Publishing House, 1981. – 150 p.

3. Faust L.Y. A Velocity FunctionIncluding Lithologic Variation // Geophysics. – 1951. – Vol. 18. – P. 271–288.

4. Gardner G.H.F. Formation velocity and density // The diagnostic basics for stratigraphic traps : Geophysics, 1974. – Vol. 39. – P. 770–780.

5. Restoration of acoustic properties of rocks according to geophysical research wells / G.R. Vakhitova [et al.] // Materials of the 12th scientific-practical conference and exhibition EAGE «Engineering geophysics 2016». – Anapa, 2016. – April 25-29.

6. Danilieva N.A., Daniliev S.M., Bolshakova N.V. Allocftion of deep-lying brine aquifer in the rock of chemogenic section based on the data of geophysical well logging and 2D seismic exploration // Journal of Mining Institute. – 2021. – Vol. 250. – P. 501–511.