

УДК 550.832.44(47,57)

СЖАТИЕ МНОГОМЕРНЫХ ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Е. В. Заичкин, А. В. Шумилов

Аннотация. Описаны основные принципы сжатия данных с использованием вейвлет-анализа. Рассмотрено влияние степени сжатия на погрешность определения геофизических параметров для различных видов исследований скважин.

Ключевые слова. Вейвлет-анализ, сжатие данных, акустические методы, «Сжатие ГИС», передача данных, оперативная обработка.

Abstract. The basic principle of data compression using a wavelet analysis. The effect of compression ratio on the error in the determination of geophysical parameters for different types of research wells.

Key words. Wavelets, data compression, acoustic methods, WLD Compression, data transfer, quick interpretation of geophysical data.

Введение

Удаленность полевых партий, а также сокращение сроков представления заключения заказчиком промыслово-геофизических работ требуют быструю передачу информации по каналам связи со скважины в интерпретационные центры, либо производить обработку и интерпретацию промыслово-геофизических данных непосредственно на скважине.

Второй вариант решения проблемы, часто применяемый зарубежными компаниями, в виду ряда как объективных, так и субъективных причин не нашел практического применения в российских геофизических компаниях. Поэтому единственным способом оперативной обработки и интерпретации промыслово-геофизических данных является передача их по сотовым или спутниковым каналам связи со скважины в интерпретационные центры.

Каковы объемы промысловой геофизической информации необходимой для передачи по каналам связи? При регистрации обычных коротажных кривых такой объем

составляет до 1 Мб на 1 км записи при шаге по глубине 10 см. Совсем иначе обстоят дела с многомерными данными, например, волнового акустического каротажа, скважинного акустического сканера, магнитоимпульсной дефектоскопии и других, которые, кроме того, могут регистрироваться с более мелким шагом по глубине. Таким образом, объем регистрируемых данных может варьировать от нескольких десятков до сотен мегабайт, а для больших интервалов записи регистрация комплексом геофизических методов может достигать нескольких гигабайт. С увеличением разрешающей способности методов, переходом на работу сканирующими приборами объемы исходной геофизической информации будут неизменно увеличиваться.

В настоящее время наиболее распространенным и самым дешевым способом передачи данных является передача данных по сотовой связи 2G/3G. Стоимость передачи 1 Мб данных не превышает 0.2-0.3\$, а время передачи файла размером 10 Мб составляет примерно 1-3 минуты, если сотовая сеть поддерживает 3G.

Более универсальным, с точки зрения покрытия и стабильности трафика, являются спутниковые системы передачи данных (например, *Inmarsat BGAN*), которые позволяют передавать данные объемом 10 Мб примерно за 3-6 минут. Однако стоимость передачи по спутниковым каналам намного выше, чем в *GSM*-сетях и составляет в среднем около 7\$ за 1 Мб данных.

Программное обеспечение для сжатия геофизических данных

Одной из возможностей снижения времени и стоимости передачи данных является сжатие исходных геофизических данных перед их передачей по каналам связи. Сжатие исходных данных без потерь с помощью стандартных архиваторов может обеспечить степень сжатия в среднем в 1.5 – 3 раза.

Для решения вопроса оперативной передачи геофизической информации большого объема необходимо применять алгоритмы, позволяющие с минимальными погрешностями в информативных частях исходных данных обеспечивать степень сжатия на порядок выше, чем стандартные алгоритмы.

В начале 2000-х годов группой пермских специалистов геофизиков и математиков было разработано программное обеспечение (ПО) для ЭВМ «Сжатие волнового акустического каротажа» (Сжатие ВС) [2, 4], которое в течение нескольких лет успешно применяется в производственном режиме более чем в 20 крупных геофизических

компаниях России и Казахстана. Указанное ПО обеспечивает сжатие данных волнового акустического каротажа (ВАК) в среднем в 15 – 20 раз для акустического каротажа цементирования (АКЦ) и в 10 – 15 раз для задач открытого ствола. Отличительной особенностью программы является возможность выбора степени сжатия волнового сигнала (ВС) при заданном уровне погрешности, что позволяет контролировать погрешность сжимаемых данных, обеспечивая максимальную степень сжатия при минимальных искажениях ВС в информативных областях данных.

Однако, во время многолетней эксплуатации данного ПО были выявлены некоторые ограничения применяемой методики:

- невысокая скорость упаковки и распаковки данных;
- высокая погрешность в случае регистрации волнового сигнала плохого качества;
- сильное искажение низких амплитуд при определенных настройках параметров сжатия;
- невозможность применения сжатия для геофизических данных, отличных от волнового сигнала.

Описанные ограничения привели к необходимости создания новой методики сжатия данных, на основе которой было разработано ПО «Сжатие ГИС» [1]. Сравнение возможностей программ «Сжатие ВС» и «Сжатие ГИС» продемонстрировано в таблице.

В основе новой методики сжатия и ПО «Сжатие ГИС» использован принцип вейвлет-преобразования данных. Применение вейвлет-преобразования в ПО «Сжатие ГИС» состоит из следующих трех основных этапов:

1. Преобразование данных на основе применения прямого вейвлет-преобразования и сохранение вейвлет-коэффициентов во внутренней структуре;
2. Исключение незначимых коэффициентов вейвлет-преобразования посредством обнуления заданного числа коэффициентов, наименьших по модулю;
3. Восстановление данных с помощью вычисления обратного вейвлет-преобразования по сохраненным коэффициентам.

Одномерное вейвлет-преобразование

Применение прямого вейвлет-преобразования представляет массив исходных данных в виде набора коэффициентов усреднения и детализирующих коэффициентов на различных уровнях (масштабах) [5].

Пусть дан массив исходных данных

$$a_1, a_2, \dots, a_N.$$

Данный массив может быть представлен двумя массивами

$$s_1, s_2, \dots, s_{N/2} \text{ и } d_1, d_2, \dots, d_{N/2},$$

где s_i – коэффициенты усреднения, d_i – детализирующие коэффициенты.

Коэффициенты вейвлет-преобразования s_i и d_i могут быть вычислены применением низкочастотного и высокочастотного фильтра к исходным данным, то есть

$$s_i = \sum_k u_k a_k, \quad d_i = \sum_k v_k a_k,$$

где u_k и v_k – коэффициенты фильтров.

Полученные коэффициенты усреднения так же могут быть представлены двумя массивами, пока не будет получен нужный уровень детализации. Таким образом, после применения прямого вейвлет-преобразования получаем матрицу коэффициентов

$$\begin{aligned} & d_1^1, d_2^1, d_3^1, d_4^1, \dots, d_{N/2}^1 \\ & d_1^2, d_2^2, d_3^2, \dots, d_{N/4}^2 \\ & \dots \\ & d_1^M, d_2^M, \dots, d_K^M \\ & s_1^M, s_2^M, \dots, s_K^M \end{aligned} \quad (1)$$

Обратное вейвлет-преобразование заключается в восстановлении данных по матрице коэффициентов. Если имеются массивы коэффициентов усреднения и детализации

$$s_1, s_2, \dots, s_{N/2} \text{ и } d_1, d_2, \dots, d_{N/2},$$

то исходные данные могут быть восстановлены суммированием

$$a_i = \sum_k u'_k s_k + \sum_k v'_k d_k,$$

где u'_k и v'_k – коэффициенты обратного вейвлет-преобразования.

Применяя данную формулу последовательно к строкам матрицы коэффициентов, получим восстановленные данные. Различные типы вейвлетов отличаются коэффициентами высокочастотных и низкочастотных фильтров [3].

Двумерное вейвлет-преобразование

Реализованные двумерные вейвлеты основаны на применении одномерного вейвлет-преобразования последовательно к строкам и столбцам матрицы исходных данных [6].

Пусть имеется матрица исходных данных размером $m \times n$. Применяется одномерное вейвлет-преобразование к каждой строке матрицы. Для каждой строки получаем матрицу (1). Данная матрица преобразуется в массив таким образом, чтобы коэффициенты усреднения оказались первыми

$$s_1^M, s_2^M, \dots, s_K^M, d_1^M, d_2^M, \dots, d_K^M, \dots, d_1^2, d_2^2, d_3^2, \dots, d_{N/4}^2, d_1^1, d_2^1, d_3^1, d_4^1, \dots, d_{N/2}^1.$$

Из полученных массивов составляется новая матрица размером $m \times n$. Аналогичные действия применяются к каждому столбцу новой матрицы.

Для обратного вейвлет-преобразования действия выполняются в обратном порядке с применением обратного одномерного вейвлет-преобразования.

Сжатие двумерных данных

Исходными данными являются матрица вещественных чисел F_{mn} (геофизические данные) и коэффициент сжатия $K \in (0; 1)$.

Алгоритм сжатия следующий:

1. К двумерным данным F_{mn} применяется вейвлет-преобразование с использованием двумерного вейвлета. Подбор вейвлета осуществляется автоматически в зависимости от исходных данных. Критерием подбора является минимизация функционала $\Psi(\Delta/K)$, где Δ - относительная погрешность рассчитываемых параметров в результате сжатия;
2. К полученным коэффициентам вейвлет-преобразования применяется алгоритм исключения, то есть обнуляются все коэффициенты, кроме N наибольших, где $N = m \times n \times (1 - K)$;
3. Коэффициенты вейвлет-преобразования представляются в виде одномерного вещественного массива;
4. Полученный массив вещественных чисел подвергается выбранному типу квантования. Результатом является массив байт;

5. Полученный массив байт сжимается с использованием какого-либо стандартного алгоритма сжатия без потерь.

Кроме того, в архив записывается различная служебная информация: количество строк и столбцов в исходных данных, параметры квантования и т.д.

Примеры сжатия геофизических данных

Запись акустической цементометрии (АКЦ) производилась прибором МАК-2 с регистрацией данных наземной системой КЕДР при шаге квантования 2 мкс и интервалами снятия отсчетов по глубине 20 см. Объем исходных данных – 41 Мб на 1 км записи. Для анализа погрешности расчетных данных АКЦ рассчитывались стандартные параметры: интервальное время, амплитуда волны по колонне, декременты затухания и коэффициент затухания волны по колонне.

Из рис. 1 видно, что относительная погрешность увеличивается практически линейно с увеличением степени сжатия. Наибольшая погрешность будет у декрементов DK и коэффициента затухания AlphaK. Если ввести допустимую относительную погрешность равную 1% для кинематических (амплитуды АК) и 5% для динамических (DK, AlphaK, интервальное время DTP) параметров, то возможная степень сжатия для данного материала составляет 35 раз.

На рис. 2 представлено сравнение трасс волнового сигнала при АКЦ до и после сжатия при разных степенях сжатия.

Запись секторного акустического каротажа производилась прибором МАК-СК и регистратором ВУЛКАН при шаге по глубине 10 см и дискретизации 0,5 мкс. На рис. 3 представлены средние относительные погрешности декремента затухания и индекса цементирования для данного примера. При допустимой погрешности 1% степень сжатия составит 50 раз.

На рис. 4 представлено сравнение трасс волнового сигнала записанного прибором МАК-СК.

Акустический каротаж в открытом стволе был отработан 4-х зондовым прибором АКШ-75 с временной дискретизацией записи 4 мкс и шагом по глубине 20 см. На рис. 5 представлена относительная погрешность определения интервальных времен продольной (DTP), поперечной (DTS) и Стоунли (DTSt) волн, а также их амплитуд (AP, AS и ASt соответственно). При допустимой погрешности в 1% для кинематических (амплитуды) и

5% для динамических (интервальные времена) параметров достижимая степень сжатия составляет 23 раза.

На рис. 6 представлено сравнение расчетных параметров акустического каротажа в открытом стволе до и после сжатия при степени сжатия в 23 раза.

Магнито-импульсная дефектоскопия колонны была отработана прибором МИД-К, с шагом записи по глубине 1 см. Прибор регистрирует затухание ЭДС по времени продольным и двумя поперечными зондами в течение 128 мс. На рис. 7 показана зависимость относительной погрешности определения толщины первой и второй колонны от степени сжатия. Погрешность составляет менее 1% для сжатия в 50 раз.

На рис. 8 представлено сравнение рассчитанных методом магнито-импульсной дефектоскопии толщин первой и второй колонн в зависимости от степени сжатия.

На рис. 9 представлена примерная степень сжатия для различных методов и приборов в пределах допустимой погрешности рассчитываемых параметров. Максимальная степень сжатия достигается для приборов секторной акустической цементометрии (МАК-СК) и магнито-импульсной дефектоскопии (МИД-К). Средняя степень сжатия для комплекса геофизических методов по оценке технического состояния колонн составляет 20 раз.

Выводы

1. Проведенные исследования показывают, что разработанная методика сжатия позволяет решить проблему оперативной передачи исходных геофизических данных большого объема со скважины в интерпретационные центры.

2. Методика позволяет адаптировать сжатие данных для других промыслово-геофизических методов. Например, для многорычажной профилометрии/кавернометрии или акустической дефектоскопии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов С.В., Гладкий С.Л., Заичкин Е.В., Наугольных О.В., Ташинов И.В., Шумилов А.В., 2013, Сжатие ГИС: Свид. № 2013611532, РОСПАТЕНТ.

2. Белов С.В., Заичкин Е.В., Козыряцкий Н.Г., Наугольных О.В., Ташинов И.В., Шилов А.А., Шумилов А.В., 2006, Методика сжатия данных волнового акустического каротажа. РД ТК 440-002-01: Тверь, Изд. ТК 440.

3. Добеши И., 2001, Десять лекций по вейвлетам: Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика».

4. Заичкин Е.В., Шумилов А.В., Белов С.В., Ташинов И.В., 2002, Сжатие полного волнового пакета акустического каротажа (Сжатие ВС): Свид. № 2002612073, РОСПАТЕНТ.

5. Уэлстид С., 2003, Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии: М., Изд. Триумф.

6. Salomon, D., 2004, Data Compression: The Complete Reference, Springer. Verlag Inc., New York.

Таблица 1. Сравнение возможностей программ «Сжатие ВС» и «Сжатие ГИС»

| | Сжатие ВС | Сжатие ГИС |
|--|---|---|
| Сжимаемые данные | Только волновой сигнал | Любые двумерные данные |
| Шаблоны сжатия | Есть | Есть |
| Мастер создания шаблонов сжатия | Нет | Есть |
| Среднее время упаковки/распаковки данных 100 МБ | 10 мин / 10 мин | 3 мин / 1 мин |
| Загружаемые форматы | Umnik, Кедр, LAS, ТРИАС, WPI, Express-4(RAP), АРМГ, Гектор, LIS, Таре (ЮГРА), Риалог, Блик-1, Блик-2 DAM, АКК, ДАК, WinLog, Геофит, ГИС-АКЦ | LIS, DLIS, Кедр, LAS, WinLog, ГИС-АКЦ, Express-4 (RAP), Сжатие ВС, Геофит, ЭМДСТ-МП, МИД-К |
| Экспорт в форматы | LIS, LAS, WPI, Umink, Кедр, АРМГ, Гектор, Express-4 (RAP), Риалог, ДАК, Таре (ЮГРА), GEO (A52) | LIS, DLIS, LAS, Соната |
| Загрузка и экспорт сопроводительной информации по замеру | Нет | Есть |
| Работа с несколькими наблюдениями | Нет | Есть |
| Оценка качества материала | Нет | Экспорт заключения по качеству в форматы Microsoft Office, Adobe PDF, HTML, Open Office, текстовые форматы и рисунки. |
| Предварительная обработка | Фильтрация, инверсия, объединение волновых сигналов. | Увязка на точку записи, коррекция глубин, объединение наблюдений, фильтрация волновых сигналов. |
| Работа с бланком | Нет | Создание шаблонов бланков, |

| | | |
|-----------------|-----|--|
| оператора | | заполнение бланков по шаблону и без, подстановка в бланки информации из полевого материала, запись бланков в текстовый файл. |
| Печать планшета | Нет | Есть |

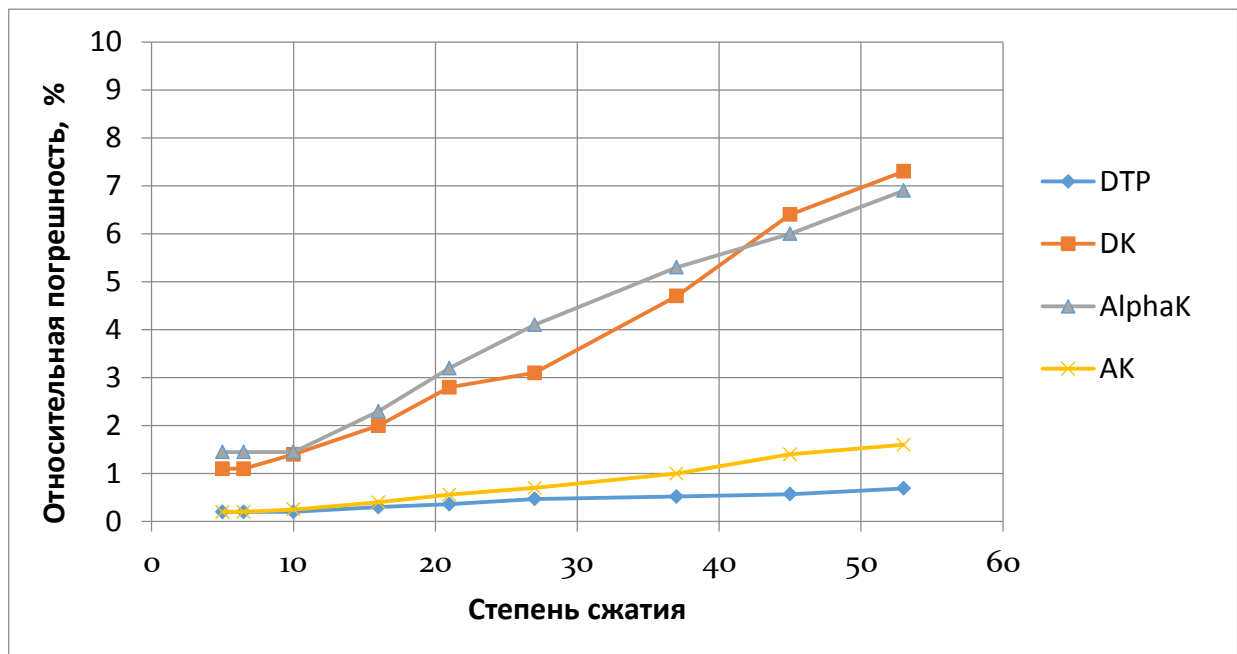


Рис.1: Запись АКЦ. Зависимости относительных погрешностей извлекаемых параметров от степени сжатия исходных данных.

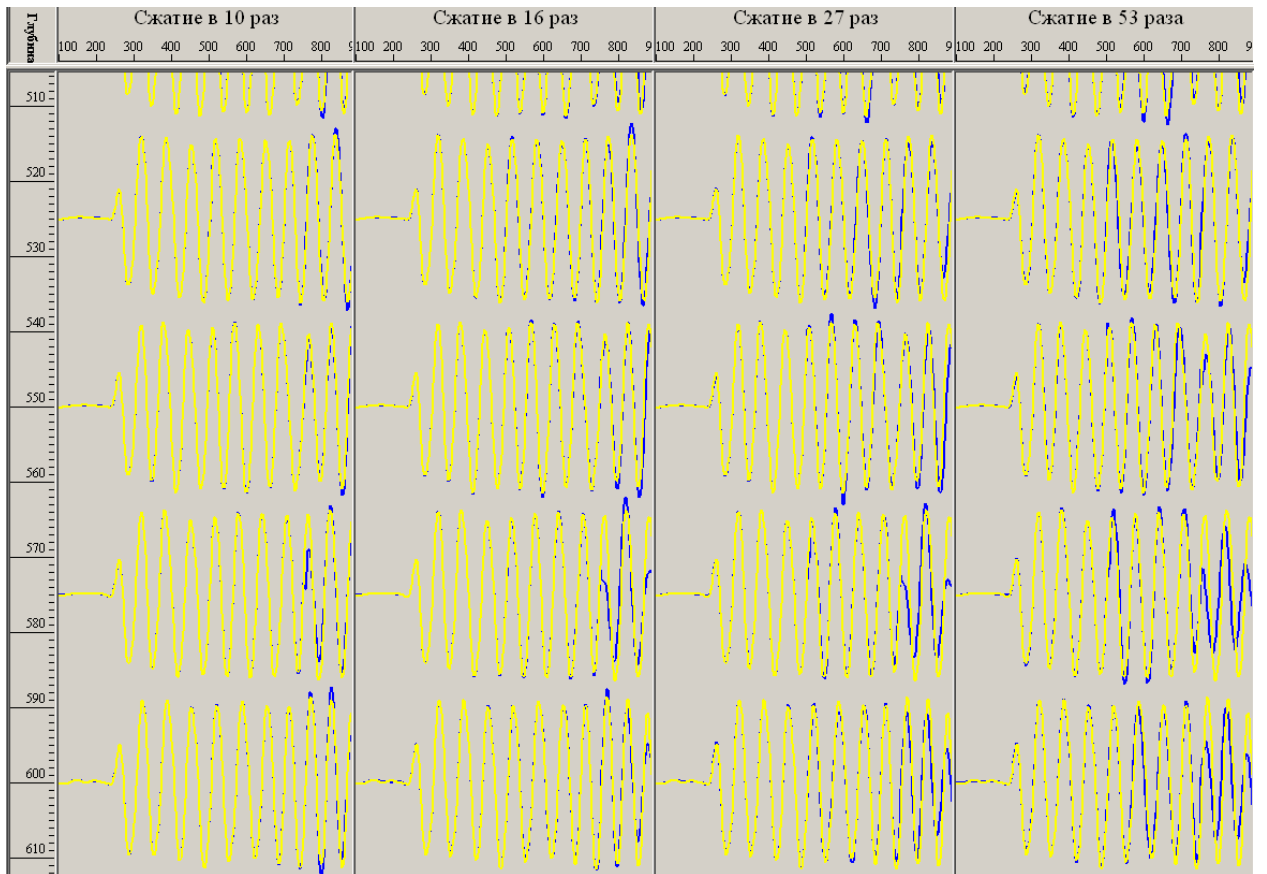


Рис.2: Запись АКЦ. Сравнение трасс волнового сигнала до и после сжатия при разных степенях сжатия.

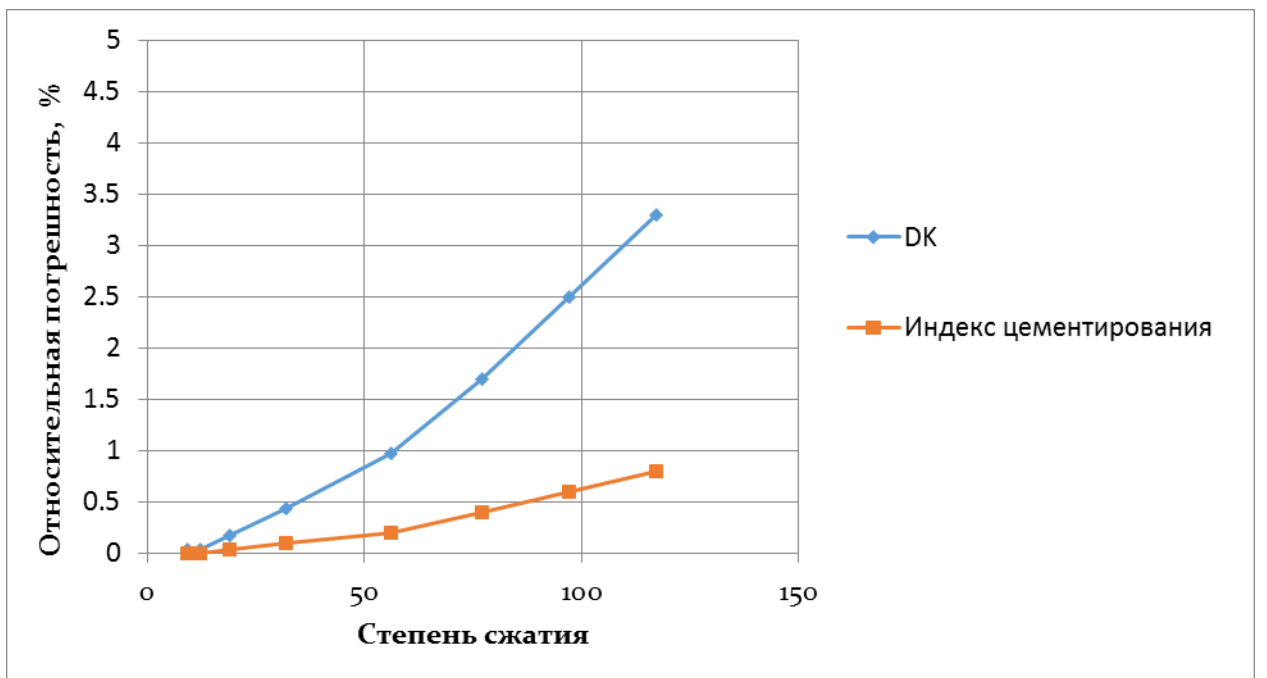


Рис.3: Секторный акустический каротаж. Зависимость относительной погрешности среднего декремента затухания и индекса цементирования при различной степени сжатия.

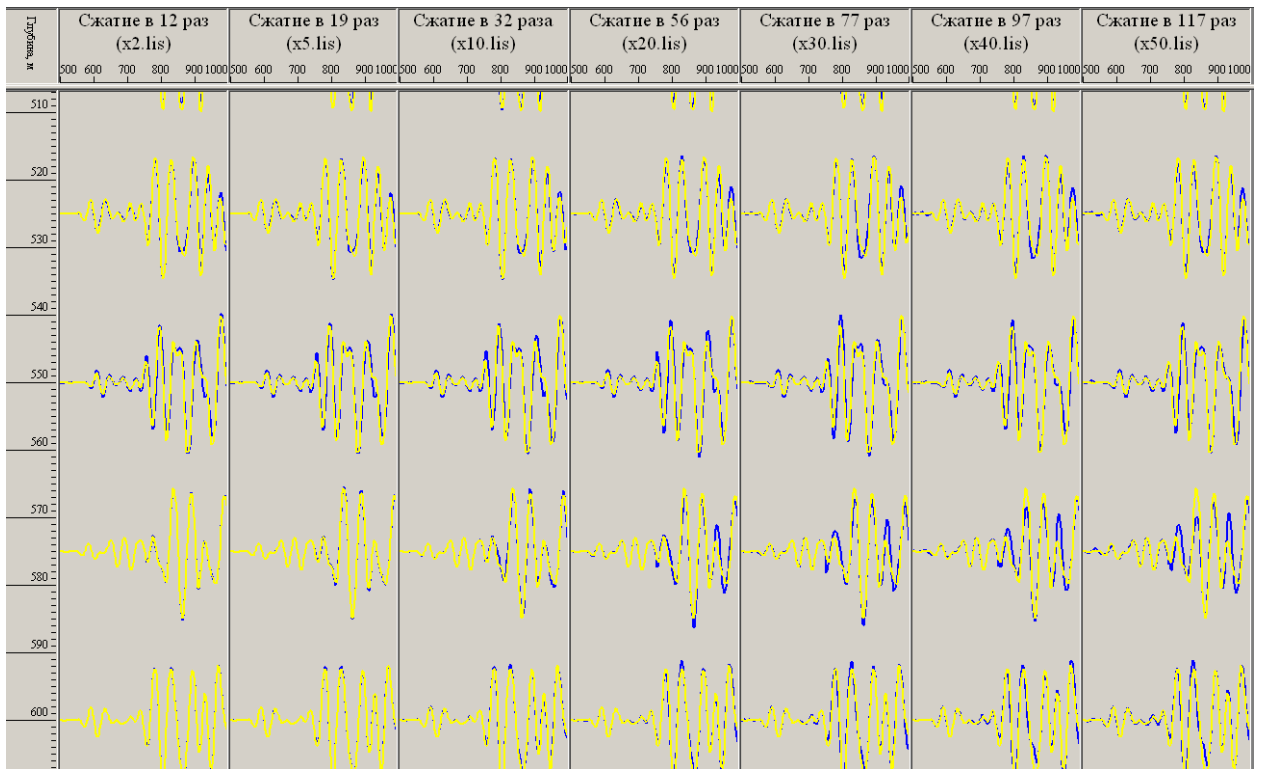


Рис.4: Секторный акустический каротаж. Сравнение волновых картин, записанных прибором МАК-СК до и после сжатия.

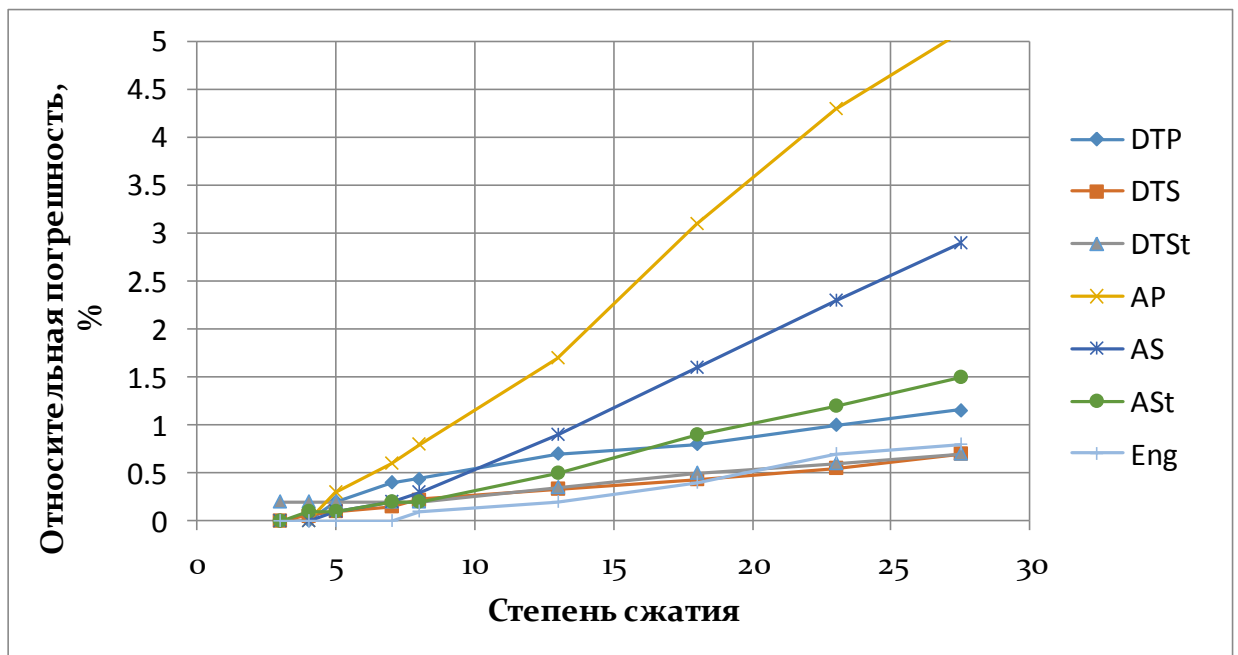


Рис. 5: Акустический каротаж в открытом стволе. Зависимости относительных погрешностей определения интервальных времен и амплитуд волн в зависимости от степени сжатия исходного материала.

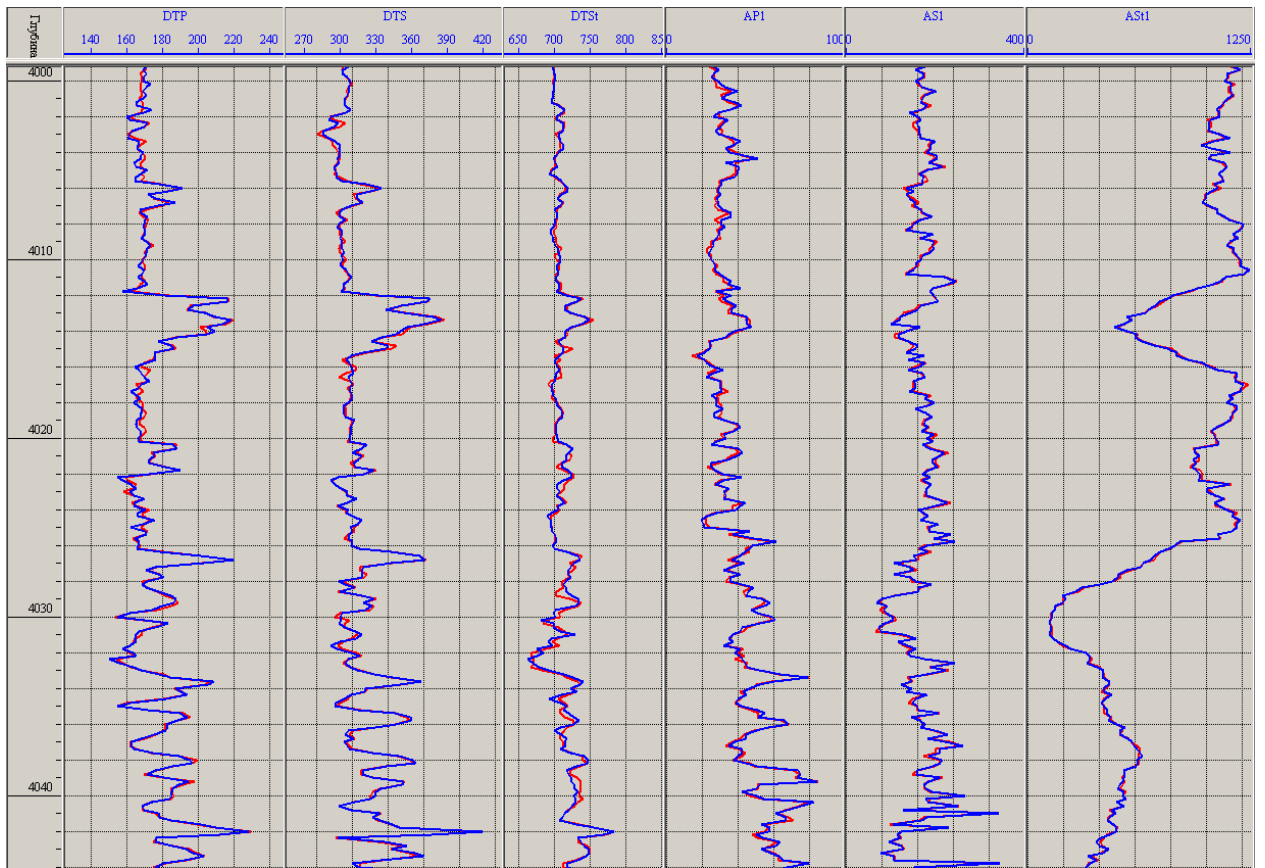


Рис. 6: Сравнение расчетных параметров акустического каротажа в открытом стволе до и после сжатия при степени сжатия в 23 раза.

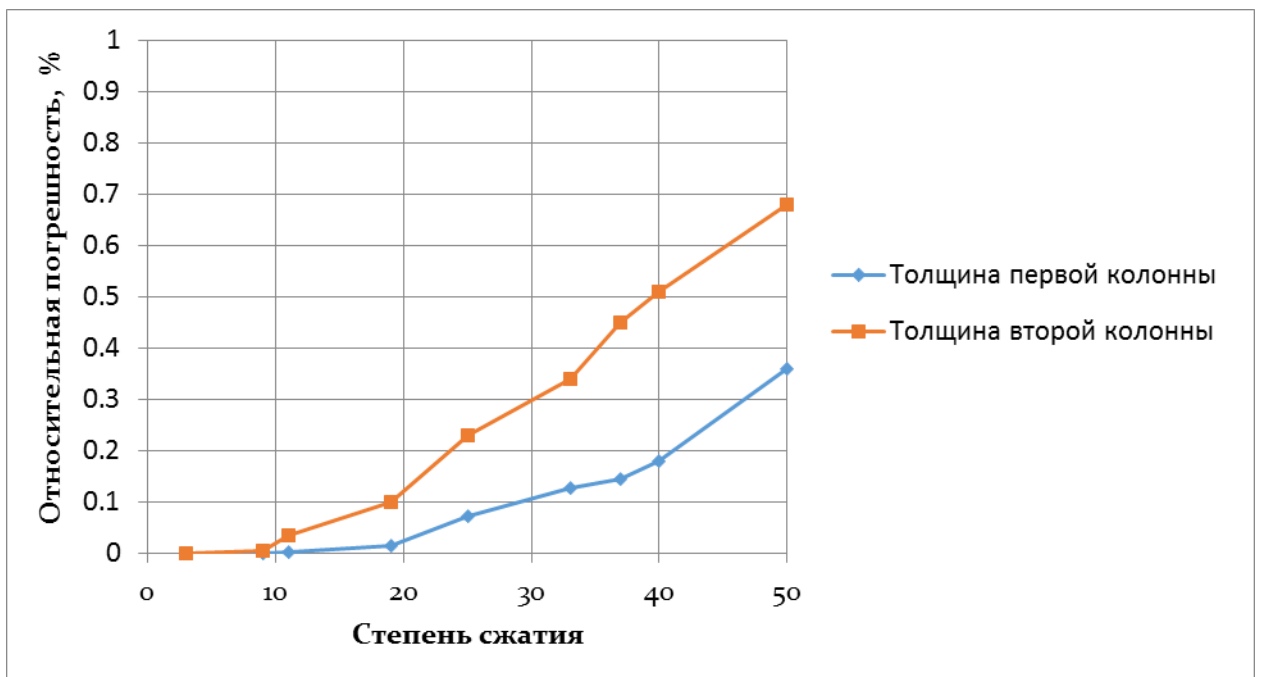


Рис. 7: Магнито-импульсная дефектоскопия. Зависимость относительной погрешности определения толщины первой и второй колонны от степени сжатия исходных данных.

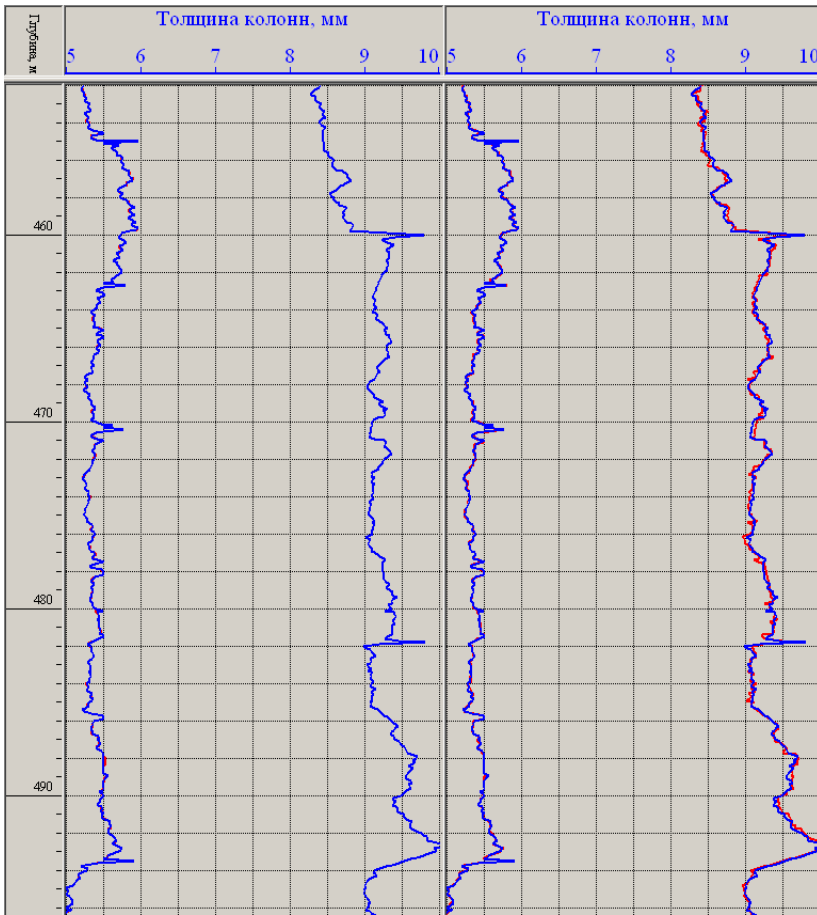


Рис. 8: Сравнение рассчитанных методом магнито-импульсной дефектоскопии толщин первой и второй колонн в зависимости от степени сжатия.

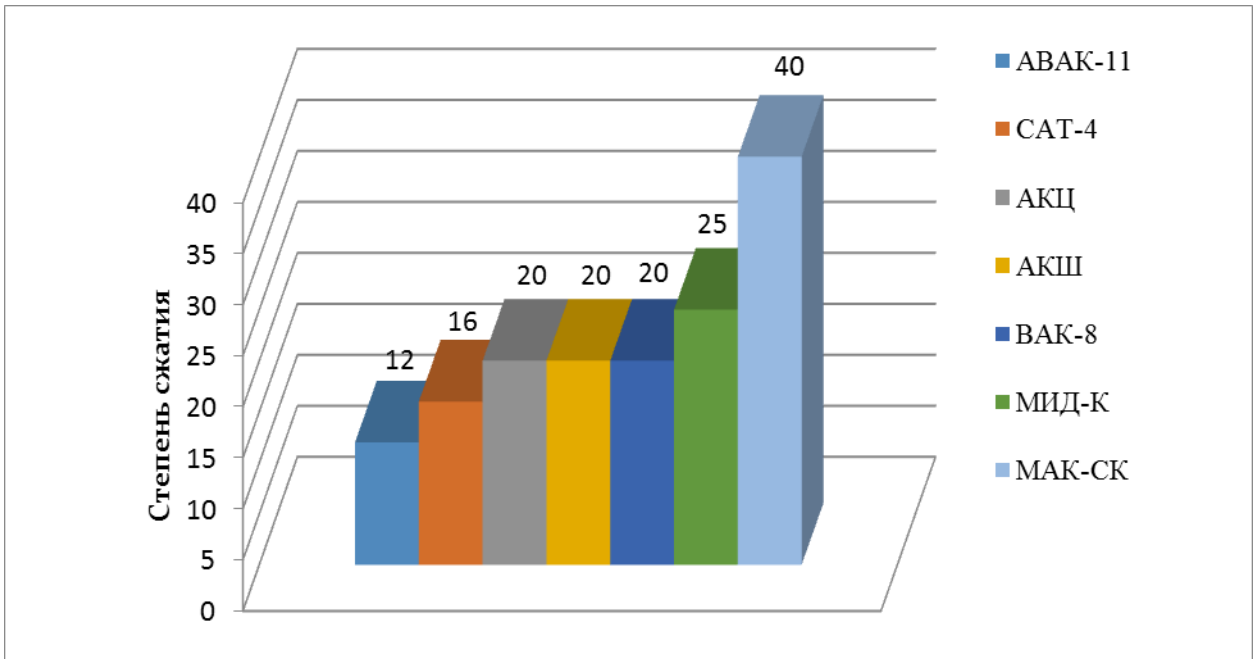


Рис. 9: Оценка степени сжатия для различных методов и приборов в пределах допустимой погрешности рассчитываемых параметров.

