

ПРОБЛЕМЫ И АЛГОРИТМЫ ПРОГРАММНОЙ ОБРАБОТКИ, ХРАНЕНИЯ, ЗАПИСИ И ОТОБРАЖЕНИЯ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ ДАННЫХ В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ ПРОВЕДЕНИЯ КАРОТАЖА МЕТОДОМ ВЕРТИКАЛЬНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ И ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

*Д.Е. Чикрин, А.А. Егорчев, А.О. Солодухина, Р.И. Закиров, Д.В. Бриский
Казанский (Приволжский) федеральный университет, dmitry.kfu@gmail.com*

Объектом исследования является система проведения каротажа методом гидроразрыва пласта и вертикального сейсмического профилирования. Предметом исследования являются алгоритмы программной обработки, хранения, записи и отображения больших объемов данных в составе комплекса проведения каротажа гидроразрыва пласта и вертикального сейсмического профилирования. Авторы подробно рассматривают такие аспекты темы, как определение необходимых элементов системы вибросейсмического комплекса, формирование структуры элементов, определение их основных характеристик и функционала, основные алгоритмы работы с большим объемом поступающих данных в режиме реального времени. Новизной результатов являются алгоритмы приема и хранения данных в ОЗУ, записи их в ПЗУ в режиме реального времени при частоте сигнала 1 000 Гц от каждого из шестнадцати модулей на одной рабочей станции, их чтения и отображения в рамках программного обеспечения оператора в рассматриваемом комплексе проведения каротажа. В результате проведения испытаний сделаны выводы о работоспособности алгоритмов в рассматриваемом комплексе.

Ключевые слова: *метод гидроразрыва пласта, алгоритмы работы с большими объемами данных, геофизические системы данных, скважинные модули, обработка данных сейсмических записей, сейсморазведка, обработка материалов вибрационной сейсморазведки, программное обеспечение управления и контроля сейсмического комплекса.*

PROBLEMS AND ALGORITHMS FOR SOFTWARE PROCESSING, STORAGE, RECORDING AND DISPLAYING LARGE AMOUNTS OF DATA IN THE COMPOSITION OF THE LOGGING SYSTEM USING THE METHOD OF VERTICAL SEISMIC PROFILING AND HYDRAULIC FRACTURING

*D.E. Chikrin, A.A. Egorchev, A.O. Soloduhina, R.I. Zakirov, D.V. Briskij
Kazan (Volga region) Federal University*

The object of the study is the system of logging by the method of hydraulic fracturing and vertical seismic profiling. The subject of the research is the algorithms of software processing, storage, recording and display of large amounts of data as part of a complex of hydraulic fracturing logging and vertical seismic profiling. The authors consider in detail such aspects of the topic as the determination of the necessary elements of the vibroseismic complex system, the formation of the structure of the elements, the definition of their main characteristics and functionality, the basic algorithms for working with a large amount of incoming data in real time. The novelty of the results are the algorithms for receiving and storing data in RAM, recording them in ROM in real time at a signal frequency of 1 000 Hz from each of the sixteen modules on one workstation, reading and displaying them within the operator's software in the considered logging complex. As a result of testing, the conclusions about the efficiency of the algorithms in the considered complex are made.

Keywords: *hydraulic fracturing method, algorithms for working with large amounts of data, geophysical data systems, well modules, seismic data processing, seismic exploration, processing of materials of vibration seismic, management and control software for seismic complex.*

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) на сегодняшний день представляет собой эффективный и прогрессивный метод увеличения продуктивности добычи полезных ископаемых из скважин. Суть метода заключается в нагнетании флюида в пласт под

давлением, достаточно высоким, чтобы вызвать разрыв пласта [2]. После, под воздействием давления жидкости в скважине, происходит увеличение размеров трещин разрыва. Для сохранения трещин и недопущении их закрытия их заполняют закрепляющим агентом, например, кварцевый песок или различные пропанты. В результате создается канал с повышенной проводимостью, таким образом достигается увеличение притока углеводородов.

При проведении работ по гидравлическому разрыву пласта происходит излучение энергии – распространение колебаний, сейсмических волн от места образования трещины в процессе ее образования и расширения во всех направлениях. Зарегистрировать эти колебания возможно как на поверхности, так и в соседних скважинах. Основным показателем качества обработки данных является вероятность обнаружения истинных микросейсмических событий и точность определения пространственных координат их источников [3].

Скважинные сейсмические исследования тесно связаны с методом гидравлического разрыва пласта. Вертикальное сейсмическое профилирование применяется для оптимизации гидравлического разрыва пласта и повышения качества бурения. При этом предварительно изучаются материалы, характеризующие сейсмогеологическую и орографическую обстановку на участке работ [1]. С помощью скважинных сейсмических исследований также можно осуществлять мониторинг трещин гидравлического разрыва пласта. Инновации в современном ВСП связаны с большим объемом получаемых данных и большим разнообразием конфигураций систем наблюдения с усовершенствованными регистрирующими приборами [4].

Основными проблемами в программной реализации приема, обработки и сохранения данных в памяти рабочей станции является высокая частота прихода данных (1000 Гц от 16 модулей), а также большое количество принимаемых данных с множества модулей, не поддерживаемое по объему данных общеиспользуемым форматом – демультимплексированный SEG-D.

Для проведения мониторинга гидравлического разрыва пласта используется разработанный в Казанском Федеральном Университете аппаратно-программный комплекс, включающий в себя программное обеспечение оператора. Проведем краткое описание аналогичных современных аппаратно-программных комплексов:

Системы постоянного мониторинга WellWatcher объединяют технологии непрерывных скважинных измерений с системами сбора данных и передачи данных, позволяющие осуществлять дистанционный мониторинг скважин и резервуаров в режиме реального времени. Данные давления, температуры, плотности и расхода передаются и отображаются в программном обеспечении комплекса. Программное обеспечение называется WellWatcher Advisor. Программа предоставляет возможность использования данных замеров для управления добычей и динамикой пласта в реальном времени. Оно включает в себя обработку данных и отображение в режиме реального времени. Преобразования исходных данных обрабатываются с частой раз в секунду. Модуль также вычисляет градиент жидкости для определения обводненности и определения прорыва газа.

Комплекс OptaSense делает возможным постоянный мониторинг скважины, особенно таких важных событий, которые возникают в существующих местах разломов. Благодаря широкой полосе пропускания и возможностям расширенного динамического диапазона технологии OptaSense DAS, большие низкочастотные сейсмические сигналы, генерируемые в существующих местах разломов, могут быть точно измерены. В наклонных скважинах большая длина сенсора позволяет осуществить геолокацию записанных микросейсмических событий.

Целевые задачи

В рамках темы работы были решены следующие задачи:

- 1) Исследование существующих аппаратно-программных систем сейсморазведки, направленных на метод ГРП,
- 2) Определение необходимых элементов системы проведения каротажа, формирование структуры элементов, определение их основных характеристик и функционала,
- 3) Определение алгоритмов приема и хранения данных в ОЗУ, записи их в ПЗУ в режиме реального времени при частоте сигнала 1000Гц от каждого из шестнадцати модулей на одной рабочей станции, их чтения и отображения в рамках программного обеспечения оператора.

Описание элементов, структура и характеристики системы каротажа

Получаемые комплексом данные имеют ценность для сейсморазведки на этапах разведки и доразведки месторождений, они также могут иметь самостоятельное значение при разработке и эксплуатации различных видов залежей.

Для работы с данными необходимо понятное ПО оператора, которое должно предоставлять весь необходимый функционал для работы с комплексом, а также обработку, отображение и хранение данных, приходящих от модулей. Также ПО должно обеспечивать качественную передачу данных, без потерь, с возможностью восстановления битых пакетов.

Аппаратная составляющая комплекса

Аппаратный комплекс состоит из: скважинной связки с количеством модулей, достигающим до 40 шт.(обработка в ПО до 16 одновременно), скважинного транслятора и блока управления данными скважинных модулей, блока приема и управления данными наземных модулей, блока синхронизации, наземных модулей, нескольких блоков питания (в том числе управляемый блок питания).

На рис. 1 представлена система спуска-подъема (БСП), с помощью которого скважинные модули опускаются в скважину [9]. На рис. 2 представлена общая схема разработанного комплекса АВСП. Двусторонними стрелками показана передача информации при взаимодействии составных частей в обе стороны.

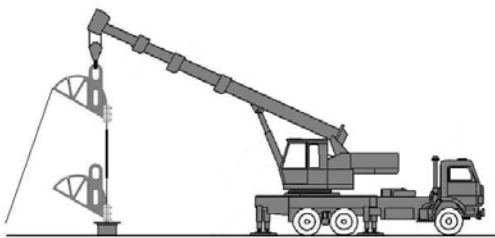


Рисунок 1. Проведение операции спуска-подъема с использованием специального приспособления.



Рисунок 2. Общая схема комплекса.

Описание элементов комплекса:

- 1) Блок синхронизации. Для записи данных при возбуждении сейсмических колебаний должна выполняться синхронизация работы комплекса с пунктом возбуждения. Синхронизация работы комплекса осуществляется по сигналам от модуля сопряжения с пунктом возбуждения, который получает сигналы синхронизации по радиоканалу от оборудования пункта возбуждения, размещённом на требуемом отдалении от скважины

с размещёнными СМ. Пункт возбуждения является стандартным элементом в составе комплекса АВСП. Сигнал синхронизации принимается радиоприемным устройством, радиоприемное устройство передает сигнал по аналоговому каналу в блок синхронизации. Блок синхронизации передает сигнал синхронизации в модуль управления наземными каналами, далее сигнал синхронизации через коммутатор поступает в ПК АРМ оператора, ПК АРМ оператора по сигналам синхронизации включает запись данных, поступающих от скважинных модулей. Данные от скважинных модулей могут быть представлены в виде графиков на экране ПК АРМ оператора (визуализация), и записаны в хранилище данных для дальнейшей работы с ними.

2) Скважинные модули. Осуществляют сбор информации от 3-х ортогонально расположенных сейсмоприемников (X, Y, Z), представлены на рис. 3.

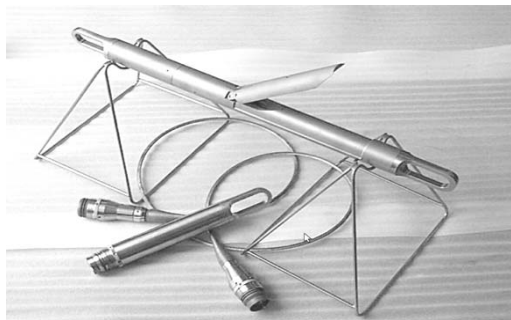


Рисунок 3. Скважинный модуль.



Рисунок 4. Наземные модули.

3) Наземные модули. Осуществляют сбор информации от сейсмоприемника (ось Z). Передают данные по радиоканалу. Устанавливаются на поверхности. Представлены на рис. 4.

4) Блок приема и управления данными наземных модулей. Осуществляет прием от всей связки скважинных модулей и предварительную обработку данных. Позволяет изменять выходную мощность передатчика и режим модуляции сигнала. Позволяет получить общую информацию о принятых и отправленных пакетах (например, общее число принятых пакетов с ошибками), уровень принимаемого сигнала, напряжение АКБ (аккумуляторная батарея), температуру АКБ, процент заряда от номинального.

5) Скважинный транслятор и блок управления данными скважинных модулей. Обеспечивают: прием и предварительную обработку информации, управление прижимными устройствами модулей, прием информации со вспомогательных каналов, переключение усиления сигнала, сбор информации со всех модулей. Также позволяет производить тестирование оборудования (скважинные модули) и установку начальной глубины связки.

6) Блоки питания (в том числе управляемый блок питания). Управляемый блок питания tdk-lambda представлен на рис. 5, он используется для подачи питания на скважинные модули для осуществления прижима/отжима в зависимости от полярности напряжения.



Рисунок 5. Управляемый блок питания tdk-lambda.

Программа оператора

На всех этапах геофизических работ применяются современные быстродействующие компьютеры [7]. Таким образом автоматизированное рабочее место оператора представляет из себя персональный компьютер со специализированным ПО АРМ оператора, которое позволяет управлять и контролировать все процессы в ходе работы комплекса.

Программное обеспечение комплекса позволяет проводить следующие технологические операции:

- создание, сохранение и открытие данных формата SEG-D,
- установка и просмотр исходных технологических параметров системы,
- корректировка технологических параметров комплекса в процессе работы,
- контроль функционирования скважинных и наземных модулей,
- взаимодействие с сейсмическими источниками, инициализация регистрации, прием данных регистрации, визуальный контроль данных и их запись на жесткий диск компьютера,
- взаимодействие с блоком синхронизации,
- препроцессинг, вывод результатов препроцессинга на дисплей,
- вывод на принтер сейсмограмм,
- управление блоком питания,
- экспресс обработка данных с целью оценки качества полевого материала,
- экспресс проверка целостности пакетов и их исправление,
- получение сводных сейсмограмм, помимо исходных данных,

Данные от скважинных и наземных модулей могут быть представлены в виде графиков на экране ПК АРМ оператора (визуализация), и записаны в хранилище данных для дальнейшей работы с ними.

Один из основных режимов для работы с данными - режим «ВСП» (рис. 6, а). Данный режим позволяет производить почти все требуемые технологические операции. При установке «запись», данные сохраняются в выбранный пользователем формат (SEG-D). Сохраненные ранее проекты можно открывать для дальнейшей работы с ними. ПО предоставляет возможность указать параметры записи, вывести на принтер полученные графики, а также производить предварительные настройки для всех модулей. Помимо оригинальных данных имеется возможность загрузить различные виды корреляции с данными от синхронизатора. Для обеспечения дополнительного удобства в проекте создается дополнительный файл, в котором находится информация (имя оператора, дата создания, количество записей, время работы и т.д.).

Режим «Сервисный» представлен на рис. 6, б. Он необходим для тестирования отдельных компонентов комплекса, проверки целостности пакетов.

В режиме предусмотрен функционал автоматического прижима скважинных модулей к стенке скважины. Он осуществляется с помощью подачи команд на управляемый блок питания. Контролируя силу тока, подаваемую от блока питания, а также переключаясь между скважинными модулями достигается правильное прижатие, учитывающее индивидуальные условия каждого модуля (различные виды сопротивления или помехи при прижатии). Кроме того, оператору доступны данные приходящие от блока питания, информация о процессе изменения при автоматическом прижатии и ручное управление для возможного вмешательства в процесс прижатия. Данный режим не имеет возможности сохранения данных и используется перед записью данных, когда необходимо проверить работу комплекса.

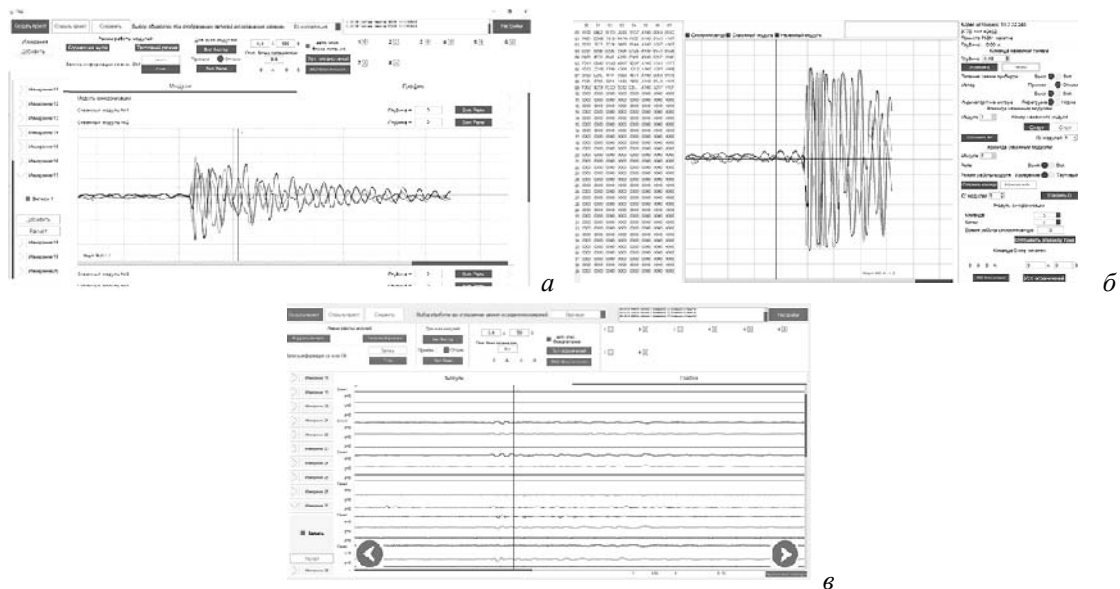


Рисунок 6. ПО оператора.

Режим «ГРП» представлен на рис. 6, в. Оператор имеет возможность просматривать данные, включая данные от синхронизатора и наземных модулей во время записи. При открытии ранее сохраненной записи, длительность которой намного превышает длительность записи в режиме «ВСП», предоставляется возможность переключения на следящий промежуток времени. Весь режим направлен на работу с длительной записью (как сохранение, так и открытие), при этом производительность остаётся стабильной.

Алгоритмы приема, обработки, сохранения и отображения данных

Общая структурная схема разделения алгоритмов работы программы по потокам изображена на рис. 7. Метод разделения по потокам предназначен для уменьшения нагрузки основного потока – графической оболочки, а также процессов приема и сохранения данных в режиме реального времени. Каждый поток выполняет свою подзадачу таким образом, что подзадачи процесса могут выполняться независимо от основного потока управления процесса [5].

Алгоритм приема и хранения данных в ОЗУ

Алгоритм приема и хранения данных в ОЗУ построен следующим образом: прием данных по протоколам TCP/UDP в отдельных потоках (поток для данных скважинных модулей, данных наземных модулей, данных синхронизатора) [8], передача данных в поток декодирования данных, декодирование данных в отдельном потоке, распределение данных по высокоуровневым классам с занесением их в отдельный поток в ОЗУ.

Алгоритм сохранения данных в ПЗУ

Проблема корректного сохранения данных состоит в совокупности критериев: высокая частота приводящих данных (1000 Гц с каждого из 16 устройств), работа программы на непрофессиональном АРМ оператора (ноутбук), работа в режиме реального времени с параллельным отображением результатов и непрерывной работы других участков программы.

Алгоритм сохранения данных в ПЗУ состоит из следующих операций:

В цикле (пока включен режим записи данных): заполнение приходящими данными

буфера А (к секунд) в ОЗУ, если буфер А заполнен, начать запись буфера А в ПЗУ, а запись приходящих данных в ОЗУ записывать в буфер Б, заполнение приходящими данным буфера Б (к секунд) в ОЗУ, если буфер Б заполнен, начать запись буфера Б в ПЗУ, а запись приходящих данных в ОЗУ записывать в буфер А.

Запись данных в ПЗУ и ОЗУ выполняются в параллельных потоках, это гарантирует запись данных без пропуска приходящих данных.

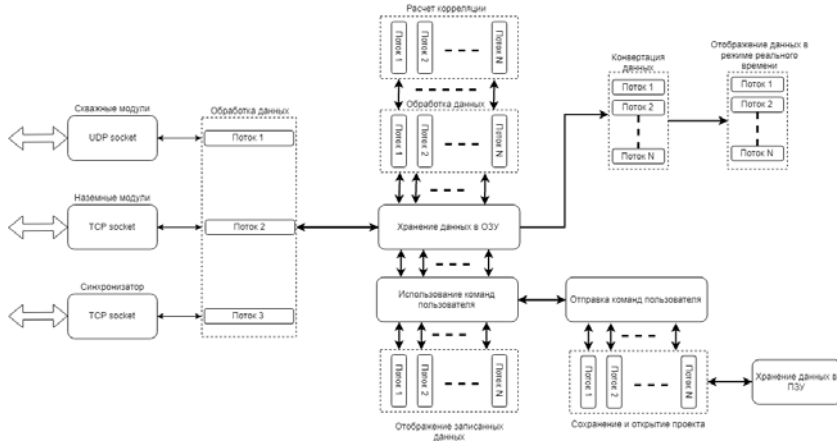


Рисунок 7. Общая структурная схема разделения алгоритмов работы программы по потокам.

Алгоритм отображения данных

В данном алгоритме создается отдельный поток для каждого канала (x, y, z) всех модулей. Потоки работают параллельно с одинаковым приоритетом. В каждом потоке вызывается функция отрисовки обработанных данных в графической оболочке программного обеспечения. Потоки являются синхронизированными с целью одновременной отрисовки графиков с данными, приходящих от всех модулей.

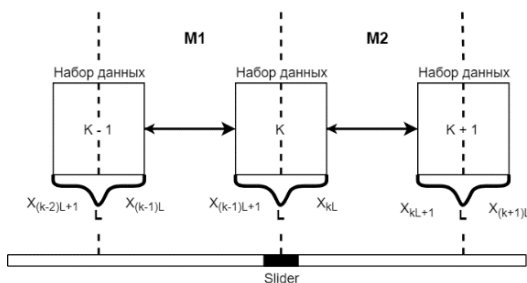


Рисунок 8. Отображение большого количества данных сейсморазведки.



Рисунок 9. Алгоритм работы открытия сейсмограмм.

В режиме ГРП требуется открытие сейсмограммы, хранящейся в группе файлов в ПЗУ, с большой длительностью до нескольких часов. Подобный набор данных по объему превышает общий объем ОЗУ рабочего места оператора. Для отображения

данных используется разработанный алгоритм без явной для оператора подгрузки данных из ПЗУ, схожий с методами работы mpar [6]. Механизм работы состоит в следующем (рис. 8) – кроме отображаемой зоны длины L (количество отображаемых данных на графике по оси X) в буфер памяти загружаются соседние части длиной, равной длине L основной зоны. При приближении оператором слайдера к правой границе выполняется алгоритм, представленный на рис. 9.

Для исключения ситуации невозможности просмотра единого графика оператором на границах наборов данных k и $k+1$ применяется специальный алгоритм, формирующий зону $M2$, состоящей из половины зоны k и половины зоны $k+1$. Таким образом у оператора не создается ощущения перехода между блоками данных.

Результаты испытаний

На вышеописанном комплексе были проведены испытания по вибрационной сейсмической разведке. Для возбуждения колебаний применялся невзрывной источник воздействия – вибратор. Работа данного комплекса и системы воздействия синхронизировалась системой управления Pelton VibPro [8]. Время возбуждений устанавливалось равным 14 с, а время записи 20 с. В скважину было погружено 8 модулей регистрации, глубина погружения составляла 190 м с расстояниями между модулями 10 м, на поверхности земли расположили 4 наземных модуля.

На рис. 10 изображен интерфейс программного обеспечения, в котором отображены результаты испытаний. В верхней части интерфейса располагаются графики от системы синхронизации, первый из них это свип-сигнал с увеличивающейся частотой. Далее располагается цифровой канал прихода сигнала о воздействии. На третьем графике отображается подтверждение начала воздействия. Ниже расположены графики, зарегистрированные с каналов трехосевых модулей, находящихся в скважине, по каждой оси соответственно, а также графики наземных каналов.

В результатах испытаний, представленных в программном обеспечении, все взаимодействие с системой синхронизации и источником вибраций осуществлено верно, получен сигнал о вибрации (канал ТВ - time break) и его подтверждение через 500мс (канал СТВ – confirm time break). Свип-сигнал зарегистрирован на всей его длительности – 14 секунд. Данные сейсмограмм записаны без потери и задержек. Как можно заметить, волна от источника воздействия распространялась от второго скважинного модуля к четвертому, это соответствует их расположению внутри скважины. В качестве первого модуля был подключен ретранслятор, собственных данных он не имеет. Наземные модули располагались рядом со скважиной. Четвертый наземный модуль был наиболее удален от источника, что соответствует полученным данным с незначительной временной задержкой.

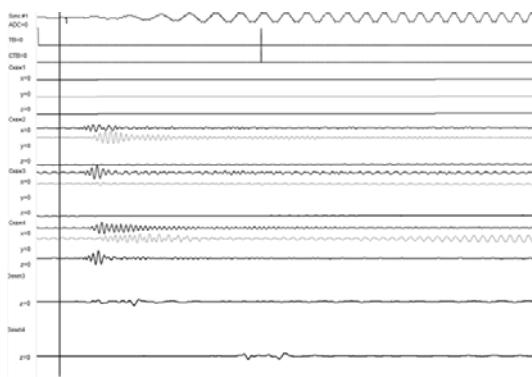


Рисунок 10. Результаты испытаний.

Выводы

Тенденция развития аппаратной составляющей комплексов проведения каротажа при различных конфигурациях оборудования предполагает увеличение количества анализируемых данных, несомненно повышающих эффективность проведения работ. По результатам испытаний была определена работоспособность предложенного аппаратно-программного комплекса, в частности программного обеспечения оператора. Описанные авторами алгоритмы показали свою способность качественно регистрировать большие объемы входящих данных (подключалось 14 модулей). Потерь данных не наблюдалось, при открытии разница между сохраненными отсчетами во времени равна времени дискретизации. В качестве АРМ оператора был использован ноутбук с процессором Intel Core i5-7200U, работающий на частоте 2.5 ГГц с 8 Гб оперативной памяти, запись в файлы производилась в твердотельные накопители. Программное обеспечение показало высокий уровень эффективности, функционируя на компьютере не промышленного назначения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 02.G25.31.0131).

Литература:

1. Bayanov A., Merkulov V., Stepanov D. Vertical seismic profiling of oil and gas wells: Tomsk: TPU, 2009. 100 p.
2. Shmakov F. Methods of processing and interpretation of ground-based microseismic monitoring of hydraulic fracturing // Seism. Technol. 2012. No. 3. pp. 65–72.
3. Shmakov F., Bortnikov P., Kuzmenko A. Modeling of the parameters of the solution of the problem of the ground-based microseismic monitoring of the hydraulic reservoir // Volga Sci. Bul. 2013. No. 3. 19 p.
4. Blackburn J., Daniels J., Dingwall S., Hampden-Smith G., Leaney S., Le Calvez J., Nutt L., Menkiti H., Sanchez A., Schinelli M. Borehole seismic surveys: Beyond the vertical profile // Oilfield Rev. 2007. V. 19. pp. 20–35.
5. Hughes C., Hughes T. Parallel and Distributed Programming Using C++. Addison-Wesley Prof., 2003. 1 ed. 720 p.
6. Beej's Guides to Network Programming, UNIX Interprocess Communication. The Open Group Base Specifications Issue 6. IEEE Std 1003.1. 2004 Edition.
7. Plaks D., Babets M. Field Geophysics. Minsk, 2016. 141p.
8. Pelton Company. Inc. System description. Febr. 6. 2003. 40 p.