

15. Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A., Dordopulo A.I. Rekonfiguriruemye vychislitel'nye sistemy na osnove PLIS semeystva VIRTEX-6 [Reconfigurable computer systems based on the FPGA of the VIRTEX-6 family], *Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii (PAVT'2011): Trudy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Parallel computing technologies (PAVT'2011): Proceedings of the international scientific conference], 2011, pp. 203-211.
16. Maksimov D.Yu., Filatov M.A. Issledovanie nelineynykh mnogosetochnykh metodov resheniya zadach odnofaznoy fil'tratsii [Study of nonlinear multigrid methods for solving single-phase filtration problems], *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha* [Preprints of IPM name M.V. Keldysh], 2011, NO. 43, 26 p. Available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-43> (accessed 09 October 2017).
17. Parallel'nye vychisleniya CUDA / NVIDIA Corporation [Parallel computing CUDA / NVIDIA Corporation], 2018. Available at: <http://www.nvidia.ru/object/cuda-parallel-computing-ru.html> (accessed 10 November 2018).
18. Superkomp'yuter RoadRunner. Laboratoriya Parallel'nykh informatsionnykh tekhnologiy NIVTS MGU [RoadRunner supercomputer. Laboratory of Parallel Information Technologies NIVTs MSU], 2008. Available at: <http://parallel.ru/computers/reviews/RoadRunner.html> (accessed 25 August 2017).
19. Vasil'ev Yu.V. Ol'shanskiy M.A. Kratkiy kurs po mnogosetochnym metodam i metodam dekompozitsii oblasti [Short course on multigrid methods and methods of region decomposition]. Moscow, 2007.
20. Fedorenko R.P. Relaksatsionnyy metod resheniya raznostnykh ellipticheskikh uravneniy [Relaxation method for solving difference elliptic equations], *Vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1961, Vol. 1, No. 5, pp. 922-927.
21. Kopchenova N.V., Maron I.A. Vychislitel'naya matematika v primerakh i zadachakh [Computational Mathematics in Examples and Tasks]. Moscow: Nauka, 1972, 367 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Э.В. Мельник.

Подопригора Александр Владимирович – ООО "НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров"; e-mail: podoprigora@superevm.ru; 347900, г. Таганрог, пер. Итальянский, 106; тел.: +78634612111; конструктор.

Чекина Мария Дмитриевна – e-mail: elfik55@gmail.com; программист.

Podoprigora Alexander Vladimirovich – Supercomputers and Neurocomputers Research Center; e-mail: podoprigora@superevm.ru; 106, Italyansky lane, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634612111; designer.

Chekina Maria Dmitrievna – e-mail: elfik55@gmail.com; programmer.

УДК 004.382.2

DOI 10.23683/2311-3103-2018-8-221-230

И.И. Левин, К.Н. Алексеев

**РЕАЛИЗАЦИЯ ОБРАТНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ
СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ДЛЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
НА РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ
В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ**

Рассмотрена возможность построения цифровых моделей месторождений углеводородов в режиме реального времени на основании данных «пассивного» микросейсмического мониторинга. Обработка первичной сейсмической информации на многопроцессорных вычислительных системах традиционной архитектуры в режиме реального времени невозможна ввиду большого объема обрабатываемых данных, сложности в организации хранения промежуточных результатов и трудоемкости выполняемых операций. Существует иная парадигма организации вычислительного процесса при решении трудоемких

сильносвязанных задач, основанная на синтезе параллельно-конвейерных программ для реконфигурируемых вычислительных систем (РВС). Согласно данному подходу, задача представляется в качестве информационного графа, состоящего из множества вершин - выполняемых операций, и множества дуг, описывающих последовательность передачи данных между вершинами, а также входные и выходные сигналы. Традиционные методы автоматического синтеза вычислительных структур предполагают прямое отображение информационного графа задачи или его части на вычислительное поле РВС, построенное из множества соединенных друг с другом программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Такой подход призван обеспечить максимальную производительность вычислительной системы, используя весь доступный аппаратный ресурс. Однако при решении задач реального времени на РВС традиционными методами производительность вычислительной системы зачастую оказывается выше необходимой, что приводит к перерасходу используемого ресурса РВС, повышенному энергопотреблению и, как следствие, излишней стоимости конечного изделия. В связи с этим была предложена новая методика синтеза параллельно-конвейерных программ для РВС, позволяющая находить минимальный аппаратный ресурс при заданном времени её решения. Согласно новому подходу, информационный граф задачи необходимо преобразовать таким образом, чтобы синтезируемая вычислительная структура обладала требуемой производительностью. Применение новой методики было проиллюстрировано решением основной вычислительно-сложной задачи микросейсмического мониторинга: обратной кинематической задачи сейсморазведки. Была приведена оценка минимальных аппаратных затрат при заданном времени нахождения решения и предложено несколько вариантов конфигураций РВС. Анализ результатов доказал эффективность применения нового подхода по сравнению с традиционными методами, на основании чего предлагается использовать новую методику создания параллельно-конвейерных программ для РВС при решении задач реального времени.

Микросейсмический мониторинг; обратная кинематическая задача; реконфигурируемые вычислительные системы; ПЛИС; задачи реального времени.

I.I. Levin, K.N. Alekseev

IMPLEMENTATION OF INVERSE KINEMATIC PROBLEM OF SEISMIC EXPLORATION FOR MICROSEISMIC MONITORING ON RECONFIGURABLE COMPUTER SYSTEMS IN REAL TIME

The paper covers the possibility to create the digital hydrocarbon deposit models in real time on the basis of "passive" microseismic monitoring data. Processing of primary seismic data is impossible on multiprocessor computer systems of traditional architecture in real time because of a large amount of processed data; the complexity of storage organization of intermediate results; the labor-intensive operations. There is a different paradigm of computational process organization during the solution of labor-intensive tightly-coupled problems. It's based on the synthesis of parallel-pipeline programs for reconfigurable computer systems (RCS). According to this approach, the problem is presented as an information graph. The graph consist of a set of vertices (the performed operations), and a set of arcs describing the sequence of data transfer between the vertices, as well as input and output signals. Traditional methods of automatic synthesis of computational structures involve the direct mapping of the information graph or part of it on the computational field of RCS, constructed from a set of interconnected programmable logic integrated circuits (FPGAs). This approach is provided the maximum performance of the computer system, using all available hardware resources. However, the performance of the computer system is often higher than necessary at solving real-time problems on the RCS by traditional methods. It leads to overspending of the used RCS resource, the increased energy consumption and, as a result, the excessive cost of final product. In this regard, a new synthesis method of parallel-pipeline programs for RCS was proposed for determining the minimum hardware resource at given solution time. According to the new approach, the information graph of the problem must be transformed in such a way that the synthesized computational structure has the required performance. The application of the new method was presented by the solution of the main computationally-laborious problem of microseismic monitoring: the inverse kinematic problem of seismic exploration. The estimation of the minimum hardware costs for a given solution time was given, and sev-

eral configurations of RCS were proposed. Analysis of the results proved the effectiveness of the new approach application in comparison with traditional methods. Therefore, the new method of creating the parallel-pipeline programs for RCS can be used at solving the real-time problems.

Microseismic monitoring; inverse kinematic problem; reconfigurable computer systems; FPGA; real-time problems.

Введение. В 2017 году Министерство энергетики Российской Федерации объявило о новом направлении «цифровая энергетика» [1], которое призвано поддержать нефтегазовую отрасль при переходе к новым технологиям контроля и управления процессами разработки месторождений углеводородов. Основной целью направления является внедрение цифровых технологий построения постоянно обновляющихся геологических моделей месторождений, основанных на обработке и визуализации сейсмических данных в режиме реального времени [1, 2]. Развитие указанных технологий позволит снизить эксплуатационные затраты на разработку скважин, увеличить объем нефтеотдачи и обеспечить извлечение нефти из труднодоступных запасов [3].

В настоящее время задача моделирования скважин месторождений решается при проведении микросейсмического мониторинга, который позволяет выявлять зоны разломов и трещиноватостей, наблюдать за гидравлическим разрывом пласта, применяющегося для стимуляции скважин, контролировать обводненность месторождения и перфорацию скважин [4, 5]. Согласно технологии «пассивного» микросейсмического мониторинга, разработанной в НИИ прикладной математики и математической геофизики БФУ им. И. Канта, сейсмические волны регистрируются датчиками поверхностной сейсмической антенны с помощью цифровой телеметрической станции, причем каждый пришедший на датчик сигнал является микросейсмическим событием. Данные накапливаются порционно в течение нескольких недель, суммарный объем первичной информации может достигать нескольких терабайт. Вся собранная информация, как правило, обрабатывается в дата-центрах суперкомпьютерами кластерного типа [4-7].

Обеспечить обработку данных микросейсмического мониторинга в режиме реального времени при данной организации вычислений невозможно ввиду большого объема поступающей информации и сложности выполняемых над ней операций.

Существует иной подход к решению вычислительно сложных задач, заключающийся в представлении алгоритма задачи в структурно-процедурном виде и последующей реализации синтезированной вычислительной схемы на реконфигурируемой вычислительной системе (РВС)[8-11]. В отличие от кластерных суперкомпьютеров РВС позволяют отображать информационный граф задачи либо его часть на вычислительное поле программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Стандартная методика создания параллельно-конвейерных программ для РВС направлена на получение максимальной производительности вычислительной системы в ограниченном объеме доступного аппаратного ресурса [12].

При решении на РВС задач реального времени традиционная методика использует весь объем доступного аппаратного ресурса. Зачастую при этом имеет место избыточная производительность вычислительной системы: порция данных обрабатывается быстрее темпа её накопления, что приводит к неоправданной стоимости конечного изделия, простоя используемого оборудования и повышенному энергопотреблению.

В связи с этим предлагается новая методика создания параллельно-конвейерных программ для решения задач реального времени на РВС, целью которой является определение минимального аппаратного ресурса синтезируемой вычислительной структуры задачи путем выполнения особых преобразований её

информационного графа. На основании полученных данных можно определить конфигурацию РВС, наиболее подходящую для решения задач обработки данных микросейсмического мониторинга в режиме реального времени.

Анализ информационного графа обратной кинематической задачи. Рассмотрим основную вычислительно трудоемкую задачу программного комплекса обработки данных микросейсмического мониторинга – обратную кинематическую задачу сейсморазведки (ОКЗ) по определению координат микросейсмических событий в пространстве и времени их возникновения. Она относится к разряду «некорректных» (использование разных алгоритмов приводит к отличным друг от друга результатам). В связи с этим строится устойчивое регуляризованное решение ОКЗ, которое обеспечивает минимальное отклонение модельных времен прихода от наблюдаемых значений [13–15].

Одним из путей решения задачи является применение алгоритма Левенберга-Марквардта, который представляет собой нелинейный метод наименьших квадратов [13, 16] и предполагает итеративное решение задачи оптимизации функционала с помощью разложения функции в полином второй степени

$$F(x_k + p) = F(x_k) + \nabla F^T(x_k)p + \frac{1}{2}p^T H(x_k)p,$$

где H – гессиан функционала F в точке x .

Однако вместо настоящего значения $H(x)$ вычисляется приближенное значение B_k , после чего находится минимум полученной функции

$$p_k = -B_k^{-1} \nabla F(x_k), \quad F = \sum_{k=0}^n w_k (T_k - (\tau_k - \tau_{ref}))^2, \quad T_k = \frac{(R_k - R_{ref})}{V},$$

где τ_k – задержка сигнала на канале;

w_k – весовые коэффициенты;

T_k – рассчитываемое время задержки для точки наблюдения события;

R_k – расстояния от данной точки до приемников;

V – скорость распространения волны в среде;

ref – номер опорного канала.

Входными данными для расчётов являются: три пространственные координаты источника сигнала x , y и z , скорость V , время задержки сигнала на каналах τ_k , весовые коэффициенты w_k , а также начальные приближения к искомому решению, которые определяются случайным образом в заданных границах [14].

На рис. 1 представлен информационный граф обратной кинематической задачи $G_{rk} = \bigcup_1^i S = \bigcup_1^n I + \bigcup_1^i \min$, где S – подзадача расчета m результирующих при-

ближений для одного набора входных координат сейсмических датчиков и выбор наилучшего из них; I – подзадача минимизации целевого функционала; i – общее количество микросейсмических событий; n – общее количество подзадач минимизации функционала.

Вершины $Din_{x,y,z,v}^{111} - Din_{x,y,z,v}^{ikm}$ представляют собой входные каналы данных, по которым поступают начальные приближения параметров заданных точек. Вершины $coord_{x,y,z}^{11} - coord_{x,y,z}^{ik}$ представляют собой входные каналы данных, по которым передаются координаты приемников сигналов. Вершины $weight^{11} - weight^{ik}$ представляют собой входные каналы данных, по которым поступают весовые коэффициенты. Вершины $tau^{11} - tau^{ik}$ представляют собой входные каналы данных, по которым передаются времена прихода сигналов на указанном канале. Подзадача \min выполняет поиск наилучшего из m вариантов и формирует конечные результаты решения обратной кинематической задачи, которые передаются по выходным каналам данных, представляющих собой вершины $Dout_{x,y,z,v}^{11} - Dout_{x,y,z,v}^{ik}$.

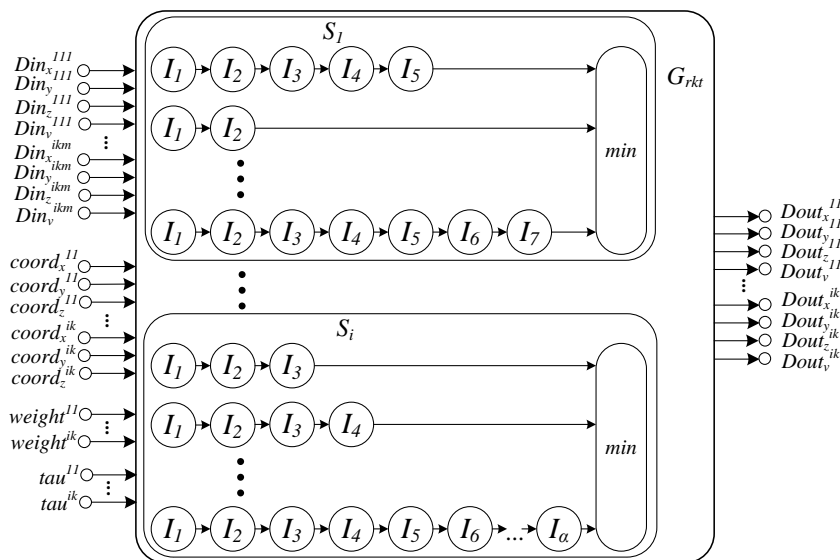


Рис. 1. Информационный граф обратной кинематической задачи G_{rkt}

В связи с тем, что количество итераций для минимизации целевого функционала при обработке каждого микросейсмического события определяется входными данными, информационный граф G_{rkt} является нерегулярным. Для синтеза универсальной параллельной программы, обрабатывающей произвольный набор входных данных, информационный граф ОКЗ необходимо привести к функционально-регулярной форме. В работах [8-10] было показано, что приведение подобного графа к прямоугольной ярусно-параллельной форме становится причиной его функциональной избыточности, поэтому в данном случае необходимо выполнить операцию векторизации вершин графа. Для этого в графе G_{rkt} выделяются базовые подграфы, информационные вершины которых заменяются специальной вершиной-массивом. При этом дуги графа получают пару признаков – адрес, строго соответствующий одной входной вершине, и временную метку, которая определяет принадлежность вершины конкретному слою [10].

После выполнения данной операции синтезированная вычислительная структура обратной кинематической задачи примет вид, представленный на рис. 2.

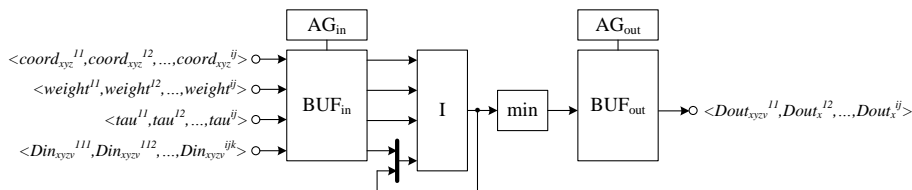


Рис. 2. Вычислительная структура ОКЗ

Кортежи входных данных $\langle \{coord_{x,y,z}^{11}, \dots, coord_{x,y,z}^{ij}\}, \langle \{weight^{11}, \dots, weight^{ij}\}, \langle \{tau^{11}, \dots, tau^{ij}\}, \langle \{Din_{x,y,z,v}^{111}, \dots, Din_{x,y,z,v}^{ijk}\} \rangle$ записываются в массив входных данных BUF_{in} . Каждое данное имеет свой адрес, формируемый адресным генератором AG_{in} . После загрузки данные передаются на обработку в вычислительную структуру обратной кинематической задачи.

Минимизация целевого функционала выполняется в блоке I столько раз, сколько того требует алгоритм. После расчета m результатов для одного микросейсмического события из них выбирается наилучшее в блоке \min . Результаты вычислений записываются в массив выходных данных BUF_{out} по адресам, которые формируются адресным генератором AG_{out} , после чего формируется выходной кортеж данных $\langle \{Dout_{x,y,z,v}^{i1}, \dots, Dout_{x,y,z,v}^{ij}\} \rangle$.

Синтез вычислительной структуры обратной кинематической задачи с заданной производительностью. Определим параметры обратной кинематической задачи сейсморазведки для конкретного опытного примера, с помощью которого проиллюстрируем способ решения геологических задач в режиме реального времени.

Для регистрации сейсмоакустических волн используется цифровая телеметрическая станция SGD-SHF48 фирмы СибГеофизПрибор [17], имеющая 48 каналов приема ($k = 48$), каждый с частотой дискретизации 1 мс. Порция данных мониторинга накапливается в течение полутора часов, общее количество микросейсмических событий $i = 5\,400\,000$. Количество вариантов начальных приближений координат заданной точки, из которых в конце обработки будет выбираться наилучшее: $m = 5$.

Программный комплекс должен успевать обрабатывать данные микросейсмического мониторинга за время сбора их новой порции. Учитывая, что ОКЗ является одной из многих задач обработки, определим максимальное время её решения: $t_Z = 15$ минут.

Время решения обратной кинематической задачи, синтезированной вычислительной структурой t_{rkt} , можно рассчитать по формуле $t_{rkt} = \frac{L \times n}{\nu} \times k$, где ν –

частота схемотехнического решения (Гц), L – количество тактов выполнения операции I . Так как все вычисления выполняются в стандарте представления чисел IEEE754 двойной точности, то в нашем случае $L = 2563$ такта, а общее число итераций, взятое приближенно для конкретного примера, $n = 140\,000\,000$. В качестве основного вычислительного элемента РВС рассмотрим ПЛИС фирмы Xilinx семейства UltraScale [18] Kintex и Virtex, которые способны обеспечить устройствам с плавающей точкой двойной точности тактовую частоту $\nu = 450$ МГц [19]. Из этого следует, что время получения решения вычислительной структурой ОКЗ составит $t_{rkt} \approx 38275$ с или около 638 минут.

Согласно новой методике синтеза параллельно-конвейерных программ для РВС, если заданное максимальное время решения задачи не совпадает со временем получения решения синтезированной вычислительной структурой, то последняя нуждается в дальнейших преобразованиях – редукции или индукции производительности [8–10, 20]. В данном случае время решения задачи вычислительной структурой больше заданного, поэтому необходимо выполнить операцию индукции. Коэффициент индукции можно рассчитать по следующей формуле:

$$i^0 = \left\lceil \frac{t_{rkt}}{t_Z} \right\rceil.$$

В данном случае коэффициент индукции $i^0 = 43$. Отметим, что операцию индукции производительности вычислительной системы необходимо провести над векторизованным информационным графом задачи. Отметим, что после проведения данной операции ресурс, который будет занимать синтезированная вычислительная структура, будет минимальным для заданной производительности.

Определение конфигурации РВС для реализации обратной кинематической задачи. Согласно традиционной методике создания параллельно-конвейерных программ, обратную кинематическую задачу сейсморазведки можно решить на РВС «Терциус», основным вычислительным элементом которой являются четыре ПЛИС фирмы Xilinx семейства Kintex UltraScale XCKU095 [21]. При максимальном заполнении ПЛИС время решения ОКЗ будет 6 мин. 17 сек., что более чем в два раза меньше заданного времени – 15 минут. В этом случае оборудование большую часть времени будет простаивать, а занимаемый вычислительной системой аппаратный ресурс будет избыточен.

Применяя новую методику синтеза параллельно-конвейерных программ для РВС, рассчитаем минимальный аппаратный ресурс, требуемый для синтеза вычислительной структуры ОКЗ с определенными выше условиями. На основании полученных данных проанализируем линейку ПЛИС UltraScale и определим варианты конфигурации РВС.

Анализ семейства Kintex UltraScale показал, что ОКЗ можно решить на двух микросхемах XCKU060 или на одной XCKU115, где заполнение по количеству триггеров будет порядка 7 %, по количеству LUT – 85 %, по количеству DSP блоков – 50 %.

Анализ семейства Virtex UltraScale показал, что ОКЗ можно решить на одной ПЛИС XCVU125 с заполнением по количеству триггеров не более 80 %, а по количеству LUT и DSP – порядка 90 % и 100 % соответственно.

Таким образом, традиционный подход к созданию параллельно-конвейерных программ для РВС в данном случае приводит как к избыточности используемого аппаратного ресурса, так и к излишней производительности вычислительной системы, более чем в два раза превышающей требуемую. Очевидно, что при реализации обратной кинематической задачи сейсморазведки в режиме реального времени целесообразно использовать новую методику, позволяющую определять минимальный аппаратный ресурс РВС, на котором можно решить задачу за заданный промежуток времени.

Заключение. В данной работе был рассмотрен вариант решения на РВС обратной кинематической задачи микросейсмики. Для нахождения минимального аппаратного ресурса задачи при заданном времени её решения была применена новая методика синтеза параллельно-конвейерных программ для РВС. На основании результатов расчётов было предложено несколько вариантов конфигураций РВС, лучший из которых можно определить путем дальнейшего анализа таких параметров изделия как энергопотребление, надежность и габариты, а также исходя из минимального аппаратного ресурса других задач обработки сейсмической информации.

Применение новой методики позволяет решать задачи обработки геологических данных в темпе их поступления, что обеспечивает требуемую производительность вычислительной системы. Благодаря этому, технологию микросейсмического мониторинга можно использовать для построения обновляющихся в режиме реального времени цифровых моделей месторождений углеводородов. Использованный метод создания параллельно-конвейерных программ для РВС можно применять для решения и других задач реального масштаба времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Внедрение и использование цифровых технологий в энергетике исходя из принципов экономической целесообразности и повышения доступности энергетической инфраструктуры и распределенной энергетики. – 2018. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/10877> (дата обращения: 14.11.2018).

2. *Гаричев С.Н., Ерёмин Н.А.* Технология управления в режиме реального времени: учеб. пособие. – М.: МФТИ, 2015. – Ч. 2. – 312 с.
3. *Бетелин В.Б.* «Цифровое месторождение» – путь к трудноизвлекаемым запасам углеводородов // *Инновации.* – 2014. – № 1. – С. 37-38.
4. *Шмаков Ф.Д.* Методика обработки и интерпретации данных наземного микросейсмического мониторинга ГРП // *Технологии сейсморазведки.* – 2012. – № 3. – С. 65-72.
5. *Алсынбаев К.С., Козлов А.В.* Средства распознавания и визуализации разломов и зон техногенной трещиноватости на основе обработки данных микросейсмического мониторинга // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта.* – 2014. – № 4. – С. 127-134.
6. *Гапеев Д.Н., Ерохин Г.Н., Седайкин Р.Д., Строков В.И.* Опыт применения микросейсмического мониторинга для контроля заводнения на месторождении Северная Трува // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта.* – 2015. – № 10. – С. 133-139.
7. *Ерохин Г.Н., Алсынбаев К.С., Брыксин В.М., Савеленко В.В., Строков В.И., Козлов А.В., Козлов М.В.* Алгоритмы интерпретации и визуализации результатов обработки данных постоянно действующего мониторинга месторождений углеводородов // *Марчуковские научные чтения – 2017: Тр. международной научной конференции (г. Новосибирск, 25 июня-14 июля 2017 г.).* – Новосибирск: Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 2017. – С. 289-295.
8. *Левин И.И.* Методы и программно-аппаратные средства параллельных структурно-процедурных вычислений: дисс. ... д-ра техн. наук, по специальностям: 05.13.11 “Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей”, 05.13.15 – “Вычислительные машины и системы”. Научные консультанты: академик РАН, д.т.н., проф. Каляев А.В., чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Каляев И.А., дис. совет ТРТУ Д 212.259.05, 2004. – 363 с.
9. *Каляев А.В., Левин И.И.* Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. – М.: Изд-во «Янус-К», 2003. – 380 с.
10. *Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И.* Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. – 2-е изд. перераб. и доп. / под общ. ред. И.А. Каляева. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – 344 с.
11. *Дордопуло А.И., Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А.* Семейство многопроцессорных вычислительных систем с динамически перестраиваемой архитектурой // *Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы: Материалы научно-технической конференции.* – Таганрог, 2007. – С. 11-17.
12. *Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Дордопуло А.И.* Реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС семейства VERTEX-6 // *Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ’2011): Тр. международной научной конференции.* – 2011. – С. 203-211.
13. *Шмаков Ф.Д., Бортников П.Б.* Решение обратной кинематической задачи локации источника сейсмического излучения для горизонтально-слоистой среды // *Вестник югорского государственного университет.* – 2011. – № 3 (22). – С. 107-111.
14. *Шмаков Ф.Д.* Программный комплекс решения обратных кинематических задач микросейсмического мониторинга // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии.* – 2010. – Т. 8, № 2. – С. 34-42.
15. *Глоговский В.М., Лангман С.Л.* Свойства решения обратной кинематической задачи сейсморазведки // *Технологии сейсморазведки.* – 2009. – № 1. – С. 10-17.
16. *Дугаров Г.А., Оболенцева И.Р., Чичина Т.И.* Оценка параметров трещиноватой среды по данным об анизотропии скоростей и поглощения сейсмических волн // *Технологии сейсморазведки.* – 2011. – № 3. – С. 49-59.
17. СибГеофизПрибор. – Режим доступа: <http://www.sibgeodevice.ru/> (дата обращения: 25.09.2018).
18. UltraScale FPGA. Product tables and product selection guide. – Режим доступа: <https://www.xilinx.com/support/documentation/selection-guides/ultrascale-fpga-product-selection-guide.pdf> (дата обращения: 25.09.2018).
19. Performance and Resource Utilization for Floating-point v7.1, 2018. – Режим доступа: https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/ru/floating-point.html (дата обращения: 25.09.2018).

20. Сорокин Д.А., Дордопуло А.И. Методика сокращения аппаратных затрат в сложных системах при решении задач с существенно-переменной интенсивностью потоков данных // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 4 (129). – С. 213-219.
21. РВС «Терциус». – Режим доступа: <http://superevm.ru/index.php?page=tertsius> (дата обращения: 14.11.2018).

REFERNCES

1. Vnedrenie i ispol'zovanie tsifrovyykh tekhnologiy v energetike iskhodya iz printsipov ekonomicheskoy tselesoobraznosti i povysheniya dostupnosti energeticheskoy infrastruktury i raspredelennoy energetiki [The introduction and use of digital technologies in the energy sector based on the principles of economic feasibility and increasing the availability of energy infrastructure and distributed energy], 2018. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/10877> (accessed 14 November 2018).
2. Garichev S.N., Eremin N.A. Tekhnologiya upravleniya v rezhime real'nogo vremeni: ucheb. posobie [Real-Time Management Technology: tutorial]. Moscow: MFTI, 2015, Part 2, 312 p.
3. Betelin V.B. «TSifrovoye mestorozhdenie» – put' k trudnoizvlekaemym zapasam uglevodorodov [“Digital deposit” – the path to hard-to-recover hydrocarbon reserves], *Innovatsii* [Innovations], 2014, No. 1, pp. 37-38.
4. Shmakov F.D. Metodika obrabotki i interpretatsii dannykh nazemnogo mikroseysmicheskogo monitoringa GRP [Methods of processing and interpreting data of ground-based microseismic monitoring of hydraulic fracturing], *Tekhnologii seysmorazvedki* [Seismic technologies], 2012, No. 3, pp. 65-72.
5. Alsynbaev K.S., Kozlov A.V. Sredstva raspoznavaniya i vizualizatsii razlomov i zon tekhnogennoy treshchinovatosti na osnove obrabotki dannykh mikroseysmicheskogo monitoringa [Means of recognition and visualization of faults and zones of technogenic fracturing based on the processing of microseismic monitoring data], *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta* [Bulletin of the Baltic Federal University. I. Kant], 2014, No. 4, pp. 127-134.
6. Gapeev D.N., Erokhin G.N., Sedaykin R.D., Stokov V.I. Opyt primeneniya mikroseysmicheskogo monitoringa dlya kontrolya zavodneniya na mestorozhdenii Severnaya Truva [Experience of using microseismic monitoring to control flooding in a field Severnaya Truva], *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta* [Bulletin of the Baltic Federal University. I. Kant], 2015, No. 10, pp. 133-139.
7. Erokhin G.N., Alsynbaev K.S., Bryksin V.M., Savelenko V.V., Stokov V.I., Kozlov A.V., Kozlov M.V. Algoritmy interpretatsii i vizualizatsii rezul'tatov obrabotki dannykh postoyanno deystvuyushchego monitoringa mestorozhdeniy uglevodorodov [Algorithms of interpretation and visualization of data processing results of the ongoing monitoring of hydrocarbon deposits], *Marchukovskie nauchnye chteniya – 2017: Tr. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (g. Novosibirsk, 25 iyunya-14 iyulya 2017 g.)* [Marchukovsky Scientific Readings – 2017: Proceedings of the international scientific conference (Novosibirsk, June 25-July 14, 2017). Novosibirsk: Institut vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy geofiziki SO RAN, 2017, pp. 289-295.
8. Levin I.I. Metody i programmno-apparatnye sredstva parallel'nykh strukturno-protseduornykh vychisleniy: diss. ... d-ra tekhn. nauk, po spetsial'nostyam: 05.13.11 “Matematicheskoe i programmnoe obespechenie vychislitel'nykh mashin, kompleksov i komp'yuternykh setey”, 05.13.15 – “Vychislitel'nye mashiny i sistemy”. Nauchnye konsul'tanty: akademik RAN, d.t.n., prof. Kalyaev A.V., chl.-korr. RAN, d.t.n., prof. Kalyaev I.A., dis. sovet TRTU D 212.259.05, 2004 [Methods and software-hardware of parallel structural and procedural calculations: dr. of eng. sc. diss. by specialties: 05.13.11 “Mathematical and software of computers, complexes and computer networks”, 05.13.15 - “Computing machines and systems”, Scientific consultants: academician RAN, doctor of technical sciences, prof. Kalyaev A.V., Corr. RAN, Doctor of Technical Sciences, prof. Kalyaev I.A., dis. advice TRTU D 212.259.05, 2004], 363 p.
9. Kalyaev A.V., Levin I.I. Modul'no-narashchivaemye mnogoprotsessornye sistemy so strukturno-protseduromoy organizatsiey vychisleniy [Modular stackable multiprocessor systems with structural and procedural organization of calculations]. Moscow: Izd-vo «YAnus-K», 2003, 380 p.

10. Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A., Shmoylov V.I. Rekonfiguriruemye mul'tikonveyernye vychislitel'nye struktury [Reconfigurable multi-pipeline computing structures]. 2nd ed., under total ed. I.A. Kalyaev. Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTS RAN, 2009, 344 p.
11. Dordopulo A.I. Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A. Semeystvo mnogoprotsessornykh vychislitel'nykh sistem s dinamicheski perestraivaemoy arkhitekturoy [Family of multiprocessor computing systems with dynamically tunable architecture], *Mnogoprotsessornye vychislitel'nye i upravlyayushchie sistemy: Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Multiprocessor computing and control systems: Materials of scientific and technical conference]. Taganrog, 2007, pp. 11-17.
12. Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A., Dordopulo A.I. Rekonfiguriruemye vychislitel'nye sistemy na osnove PLIS semeystva VERTEX-6 [Reconfigurable computer systems based on the FPGA of the VERTEX-6 family], *Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii (PAVT'2011): Tr. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Parallel computing technologies (PAVT'2011): Proceedings of the international scientific conference], 2011, pp. 203-211.
13. Shmakov F.D., Bortnikov P.B. Reshenie obratnoy kinemacheskoy zadachi lokatsii istochnika seismicheskogo izlucheniya dlya gorizonta'no-sloistoy sredy [The solution of the inverse kinematic problem of locating the source of seismic radiation for a horizontally layered medium], *Vestnik yugorskogo gosudarstvennogo universitet* [Bulletin of the Ugra State University], 2011, No. 3 (22), pp. 107-111.
14. Shmakov F.D. Programmnyy kompleks resheniya obratnykh kinemacheskikh zadach mikroseymsicheskogo monitoringa [Program complex for solving inverse kinematic problems of microseismic monitoring], *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii* [Vestnik NSU. Series: Information Technology], 2010, Vol. 8, No. 2, pp. 34-42.
15. Glogovskiy V.M., Langman S.L. Svoystva resheniya obratnoy kinemacheskoy zadachi seysmorazvedki [Properties of the solution of the inverse kinematic problem of seismic prospecting], *Tekhnologii seysmorazvedki* [Technologies of seismic exploration], 2009, No. 1, pp. 10-17.
16. Dugarov G.A., Obolentseva I.R., Chichinina T.I. Otsenka parametrov treshchinovatoi sredy po dannym ob anizotropii skorostey i pogloshcheniya seysmicheskikh voln [Estimation of parameters of the fractured medium according to the data on anisotropy of velocities and absorption of seismic waves], *Tekhnologii seysmorazvedki* [Technologies of seismic exploration], 2011, No. 3, pp. 49-59.
17. SibGeofizPribor. Available at: <http://www.sibgeodevice.ru/> (accessed 25 September 2018).
18. UltraScale FPGA. Product tables and product selection guide. Available at: <https://www.xilinx.com/support/documentation/selection-guides/ultrascale-fpga-product-selection-guide.pdf> (accessed 25 September 2018).
19. Performance and Resource Utilization for Floating-point v7.1, 2018. Available at: https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/ru/floating-point.html (accessed 25 September 2018).
20. Sorokin D.A., Dordopulo A.I. Metodika sokrashcheniya apparatnykh zatrat v slozhnykh sistemakh pri reshenii zadach s sushchestvenno-peremennoy intensivnost'yu potokov dannykh [Technique of reducing hardware costs in complex systems when solving problems with a substantially variable intensity of data flows], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 4 (129), pp. 213-219.
21. RCS «Tertsius». Available at: <http://superevm.ru/index.php?page=tertsius> (accessed 14 November 2018).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Э.В. Мельник

Левин Илья Израилевич – Южный федеральный университет; e-mail: iilevin@sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 88634612111; и.о. зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Алексеев Кирилл Николаевич – e-mail: alexseev91@mail.ru; тел.: 9283536268; аспирант.

Levin Ilya Izrailevich – Southern Federal University; e-mail: iilevin@sfedu.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634612111; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Alekseev Kirill Nikolayevich – e-mail: alexseev91@mail.ru; phone: +79283536268; graduate student.