

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ АРАСНЕ НАДООР ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГИПЕР- И МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А. Ю. Ощепков, С. Е. Попов

Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 04.08.2016 г.

Аннотация. В статье представлена распределенная информационно-вычислительная система на основе проекта Apache Hadoop для обработки данных дистанционного зондирования земли (ДДЗ) на примере гипер- и мультиспектральных спутниковых снимков. Отличительной особенностью системы является высокая скорость работы стандартных алгоритмов процессинга ДДЗ, интегрированных в среду массово-параллельного исполнения программного кода относительно его исполнения в пределах одной машины. Приведены математические описания основных вегетационных индексов, применяемых при анализе изображений формата tiff. В работе дано описание этапов: препроцессинга извлечение данных из спутниковых снимков, создание, на основе полученных результатов, файлов последовательности которые запишутся на файловую систему HDFS, имплементация их обработки с помощью процедур Hadoop MapReduce и сохранения результатов в бинарном формате чередования спектральных полос с последующим их объединением в формат BSQ, для дальнейшей работы в стандартных ГИС-пакетах, таких как «Exelis ENVI», «NEST» и т.п. В заключении приведены решения конкретных задач на примере вычисления вегетационных индексов спектральных снимков космического аппарата (КА) Landsat 7/8.

Ключевые слова: Apache Hadoop, MapReduce, JAVA, JAI, распределенные информационные системы, данные дистанционного зондирования, высокопроизводительные вычисления, спутниковые снимки, вегетативные индексы.

Annotation. The article presents the distributed information-computational system based on the Apache Hadoop project for handling remote sensing data on the basis of hyper - and multispectral satellite images. A distinctive feature of the system is high speed of the standard algorithms for processing remote sensing data, integrated in the environment of massively parallel execution of software code, relative to its executing a single computer. The paper showing mathematical descriptions of the vegetation indices used in the analysis of tiff images. Presented description of the stages of preprocessing to extract data from satellite imagery, creating, based on the results of the sequence files which are written on HDFS, implementation of processing procedures using Hadoop MapReduce and saving results in binary format of alternating spectral bands BSQ, for the further work with standard GIS packages such as «Exelis ENVI», «NEST» and etc. In conclusion, given examples of specific tasks of the calculation of vegetation indices on the basis of spectral images spacecraft Landsat 7/8.

Keywords: Apache Hadoop, MapReduce, JAVA, JAI, distributed information systems high performance computing, satellite images, vegetative indices.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день сложилась тенденция извлечения новой информации из множества терабайт данных. Такая информация

может накапливаться в результате проведения ресурсоемких научных исследований, где массив данных может достигать до сорока терабайт в сутки, социальных сетей, где только в facebook генерируется порядка пятидесяти терабайт новых сообщений в день, содержащих в себе не только текстовую информацию,

но и фото и видео контент. Так же ярким примером могут послужить астрономические наблюдения и данные дистанционного зондирования (ДДЗ) различного назначения, помимо уже имеющихся на сегодняшний день снимков (один снимок может занимать более одного гигабайта), информация продолжает накапливаться. Для эффективной обработки такого рода массивов, необходима информационная система, функционально способная в разумный отрезок времени (до нескольких десятков секунд) считывать, извлекать, преобразовывать и алгоритмически рассчитывать данные предметной области (гипер- и мультиспектральные ДДЗ), эффективно распределяя потоки по вычислительным ресурсам.

Поскольку мультиспектральные снимки содержат часть информации, невидимой человеческим глазом, возникает проблема отображения этих снимков. Для решения этой проблемы существует два основных подхода: визуализация невидимых каналов (или их смешение) как видимых (красный, зеленый или синий), либо отображения их в цвет палитры, значения оттенков которой рассчитываются на основании интенсивности цветов в невидимом диапазоне. Кроме отображения, каналы, невидимые в оптическом диапазоне, могут использоваться совместно с цветовыми каналами при математической обработке для решения задач дешифрирования и анализа изображения.

Наибольшее распространение мультиспектральные изображения получили для анализа растительного покрова из-за особенностей отражения света хлорофиллом в красном и инфракрасном каналах. Для определения состояния растительности разработано большое количество так называемых вегетационных индексов – показателей, рассчитываемых по значениям яркости в красном и инфракрасном диапазоне. Кроме анализа растительности, вегетационные индексы широко применяются для мониторинга состояния атмосферы, гидросферы, геологии и многих других областях. Отметим, что пре- и постобработка дистанционного зондирования данных обусловлена повышенными

требованиями к вычислительным ресурсам, даже на современном аппаратном уровне. Тем не менее, математические модели и алгоритмизация, заложенные в процедуры обработки ДДЗ, могут быть перенесены на парадигму параллельных вычислений.

С учётом изложенного выше, задача уменьшения времени работы алгоритмов обработки гипер- и мультиспектральных данных за счет применения распределенных процедур для их отдельных функциональных составляющих является актуальной, а ее решение востребовано в современных программных системах процессинга ДДЗ.

СРАВНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. ВЫБОР APACHE HADOOP

Для сравнения были взяты технологии OpenMP, MPI, MapReduce. OpenMP (Open Multi-Processing) инкапсулирует последовательный код и для его параллельного выполнения используется набор директив компилятора, переменные окружения и библиотечные процедуры, которые предназначены для программирования многопоточных приложений на многопроцессорных системах с общей памятью (SMP-системах). Все процессоры имеют доступ к любой точке памяти с одинаковой скоростью. Программа, созданная на базе технологии OpenMP, состоит из однопоточных и многопоточных участков. Как только поток встречает параллельную конструкцию в коде программы, он создает группу потоков и становится главным потоком. В созданной группе все потоки, включая главный, выполняют код программы. После выполнения параллельной конструкции в коде, работу продолжает только главный поток.

Стандарт MPI (Message parsing interface – интерфейс передачи сообщений), который используется в системах с распределенной памятью возник в 1994 году как решение проблемы разнообразия архитектур параллельных вычислительных систем и обеспечение возможности создания мобильных (переносимых между различными компьютерными платформами) программ. Наличие такого стандарта позволило разработать стандарт-

Сравнение технологий параллельного программирования

Программные компоненты и функциональность	MPI	OpenMP	MapReduce
Автоматическое распараллеливание	Нет	Есть (директивы компилятора)	Есть
Архитектуры оборудования	SMP, кластер, MPP	SMP	SMP, кластер
Распределенная файловая система	Нет	Нет	Есть
Механизмы восстановления в результате отказов оборудования	Нет	Нет	Есть
Алгоритм	Любой	Любой	MapReduce

ные библиотеки программ (MPI-библиотеки), в которых оказалось возможным скрыть большинство архитектурных особенностей параллельных вычислительных систем и, как результат, существенно упростить проблему создания параллельных программ. Формально MPI-подход основывался на включении в программные модули вызовов функций специальной библиотеки (заголовочные и библиотечные файлы для языков C/C++ и Fortran) и загрузчика параллельно исполняемого кода в вычислительные узлы (ВУ) [10]. Наряду с OpenMP существуют программные реализации алгоритмов обработки ДДЗ на базе параллельных вычислений MPI. В работе А. А. Дудкина «Подсистема параллельной обработки изображений для мониторинга состояния лесных угодий» предлагается интеграция технологии параллельных вычислений MPI [6].

Одной из зарекомендовавшей себя реализацией MapReduce является платформа Apache Hadoop. Hadoop – это каркас с открытым исходным кодом, в котором реализован алгоритм распределения и редукции MapReduce, лежащий в основе подхода Google к организации запросов к распределенным наборам данных. Операция map, унаследованная из функциональных языков программирования, таких как Lisp, означает применение определенной функции к списку элементов. Операция компоновки Reduce также применяется к списку, но, как правило, в этом случае список приводится к скалярному значению [1].

Так же Hadoop позволяет расширить кластер от одной до тысячи машин, каждая из которых предлагает местную вычислительную мощность. Программное обеспечение организует высокую отказоустойчивость за счет обнаружения и обработки сбоев на уровне приложений, минуя аппаратный уровень, в результате чего достигается высокая степень доступности услуги на ведущем узле кластера, в котором каждый узел может прекратить работу в результате аппаратного сбоя [1].

Технологии распределенных вычислений в облачной среде получили широкое распространение в различных областях науки, однако на сегодняшний день не удалось найти их применение в сфере тематической обработки именно ДДЗ. Ниже представлены основные параметры сравниваемых технологий (табл. 1).

Проект Apache Hadoop включает в себя следующие модули:

- Hadoop Common – общие утилиты, поддерживающие другие модули Hadoop;
- Сценарии создания необходимой инфраструктуры и управления распределенной обработкой, для удобства выполнения которых создан специализированный упрощенный интерпретатор командной строки, так называемый FS shell, запускаемый из оболочки операционной системы [2];
- Hadoop Distributed File System: распределенная файловая система, которая обеспечивает доступ высокой пропускной способностью данным приложений предназначенная

для хранения файлов больших размеров, распределенных по блокам между узлами вычислительного кластера;

- Hadoop YARN: модуль, появившийся с версией 2.0 (2013), отвечающий за управление ресурсами кластеров и планирование заданий. Работать под управлением YARN могут как MapReduce-программы, так и любые другие распределённые приложения, поддерживающие соответствующие программные интерфейсы;

- Hadoop MapReduce: программный каркас для программирования распределённых вычислений. Разработчику приложения для Hadoop MapReduce необходимо реализовать базовый обработчик, который на каждом вычислительном узле кластера обеспечит преобразование исходных пар «ключ – значение» в промежуточный набор пар «ключ – значение».

Распределенная обработка спектральных данных в системах Hadoop позволяет добиваться повышения производительности, путем изменения параметров кластера без внесения изменений в механизмы программной алгоритмизации. Размещение workflow – заданий в кластере инфраструктуры Hadoop в виде интегрированных сервисов дают эргономику доступа/запуска расчетов без необходимости разработки дополнительных web-интерфейсов и настройки веб-инфраструктуры.

Анализ работ, посвящённых обработке спектральных данных показал, что предлагаемые алгоритмы реализуется локально, либо с применением технологии распределенных вычислений MPI. Данная технология позволяет создавать масштабируемые параллельные приложения, но имеет следующие недостатки именно в плане применения ее для обработки спектральных данных:

- Высокая трудоемкость разработки приложений;
- Сложность написания программ, способных выполняться при произвольных размерах массивов и произвольном количестве процессов;
- Отсутствие поддержки объектно-ориентированного подхода.

Поэтому для решения задач обработки спектральных данных была выбрана система Apache Hadoop и интегрированная среда управления заданиями Cloudera Hue. Данный подход позволил отказаться от применения дорогостоящих систем хранения данных в пользу использования распределённой файловой системы HDFS. Преимуществами выбранной технологии повлиявшими на выбор последний стали:

- Хорошо масштабируема;
- Изначально нулевая стоимость программного обеспечения;
- Система может работать от одной машины до кластера, содержащего сотни узлов, и распределять потоки самостоятельно. Дополнительно написанные программные модули к системе, основанной на hadoop, будут неизменно работать как с одним узлом, так и с кластером.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является создание современной информационной системы, обеспечивающей увеличение производительности и интеграцию обработки данных дистанционного зондирования земли на базе технологий Apache Hadoop.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

- Сравнение и выбор массово-параллельной технологии, в рамках критериев программных наборов инструментов реализующих модель модулей/узлов для обработки ДДЗ;
- Разработка модели потоков данных в компонентной структуре расчетных модулей;
- Описание и реализация создаваемой информационной системы;
- Развертывание созданной информационной системы в условиях реального применения на примере расчета вегетационных индексов на базе мультиспектральных снимков;
- Тестирование системы (время работы) на основе реальных данных (мультиспектральных снимков сенсора Landsat 7/8).

КРАТКАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ СНИМКОВ ДДЗ

В табл. 2. представлено математическое описание основных вегетационных индексов, применяемых при анализе покрытия площадей и подстилающей поверхности гипер- и мультиспектральных снимков, использующихся в стандартных программных пакетах ГИС-систем.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ

Исходя из математической модели расчета вегетативных индексов были разработаны алгоритмы расчета индексов растительности гипер- и мультиспектральных спутниковых

снимков КА andsat7/8 на базе технологии MapReduce с использованием библиотек Java. Программные компоненты системы реализуют расчеты следующих индексов: нормализованный, инфракрасный, разностный, трансформированный и относительный.

На рис. 1 представлена диаграмма потоков данных в среде Apache Hadoop при запуске задания taskflow.

Реализованные программные алгоритмы расчета индексов имеют следующие функциональные особенности:

1. Разработанный модуль HDFSTiffReader позволяет производить построчное считывание с tiff файла, находящегося в хранилище данных в файловой системе HDFS, значений точек (пикселей) снимка, по средствам библиотеки JAI, и записывает полученную

Таблица 2

Основные вегетационные индексы [5]

№ п/п	Разновидность вегетационного индекса (ВИ)	Формула и краткое описание
1	Относительный ВИ (Ratio VI, RVI, Simple Ratio (SR))	Значения индекса изменяются от 0 до бесконечности. Для зеленой растительности значения $VI > 1$ и растут с увеличением зеленой фитомассы, сомкнутости растительности (обычно принимают значения 2–8) $RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$
2	Нормализованный разностный ВИ (Normalized Difference VI, NDVI)	Индекс может принимать значения от -1 до 1. Для растительности др., 1969 индекс NDVI принимает положительные значения, обычно от 0.2 до 0.8 $NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$
3	Инфракрасный вегетационный индекс (Infrared Percentage VI, IPVI)	Функционально IPVI и NDVI эквивалентны. Индекс может принимать значения от 0 до 1. Для зеленой растительности характерны значения от 0.6 до 0.9 $IPVI = \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \right) = \left(\frac{NDVI + 1}{2} \right)$
4	Разностный вегетационный индекс (Difference VI, DVI)	Индекс может принимать любые значения. Изовегетационные линии идут параллельно друг другу $DVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED})$
5	Трансформированный вегетационный индекс (Transformed Vegetation Index TVI)	$PVI = \sqrt{NDVI + 0.5}$ 0.5 прибавляется для исключения отрицательных значений под корнем. Функционально TVI и NDVI эквивалентны

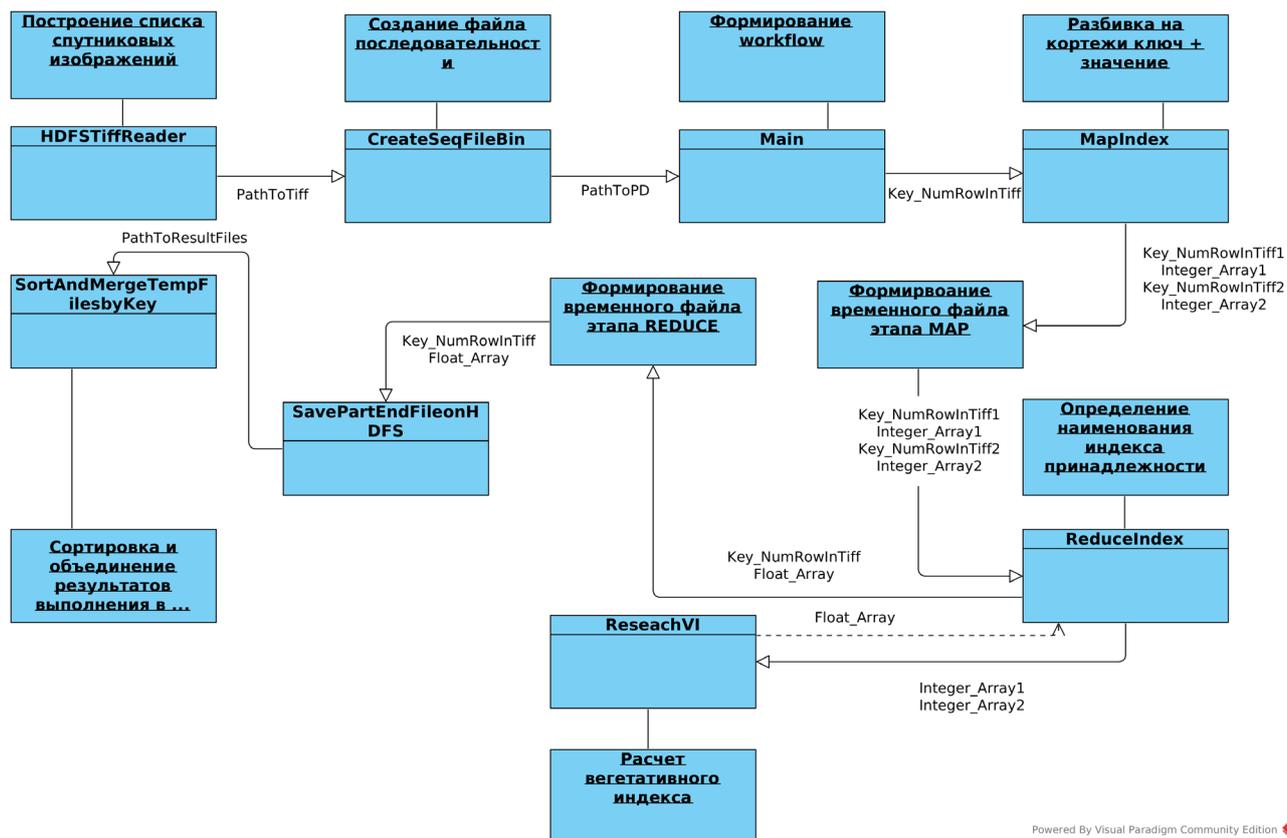


Рис. 1. Диаграмма потоков данных для расчета вегетативных индексов

Таблица 3

Переменные диаграммы потоков данных

№ п/п	Название объекта, массива	Описание
1	TiffFiles	Изображение формата tiff хранимые в файловой системе hdfs
2	PathToTiff	Массив содержащий пути нахождения изображений tiff
3	PathToPD	Массив содержащий пути нахождения бинарных файлов последовательности
4	Key_NumRowInTiff1, Key_NumRowInTiff2	Переменные содержащие наименование tiff, номер строки
5	Integer_Array1, Integer_Array2	Массивы содержащие значения пикселей извлеченных из tiff относительно переменных указанных в пункте 4
6	Float_Array	Массив содержащий значение результата работы метода по вычислению вегетативного индекса
7	PathToResultFiles	Массив содержащий пути нахождения бинарных файлов содержащие результаты работы метода по вычислению вегетативного индекса
8	BSQFile	Результирующий бинарный файл формата BSQ

информацию на этапе извлечения данных в файл, где каждая строка содержит ключ (номер строки в снимке и его наименование) и числовой массив, содержащий перечисление значений выбранных спектров точек (рис. 2).

2. Для работы с выходными данными препроцессинга созданы алгоритмы расчета индексов, в соответствии с парадигмой MapReduce, на котором построен метод обработки данных. Метод Map разбивает вход-

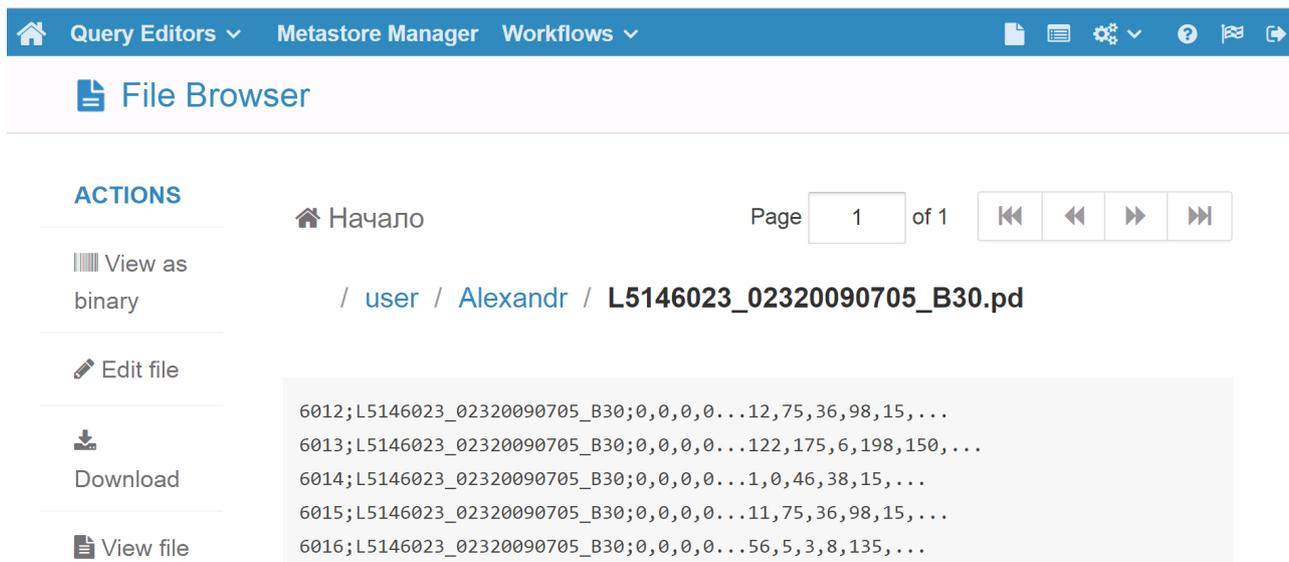


Рис. 2. Отображение выходных данных модуля HDFSTiffReader в распределенной файловой системе HDFS (фрагмент веб-интерфейса ClouderaHue)

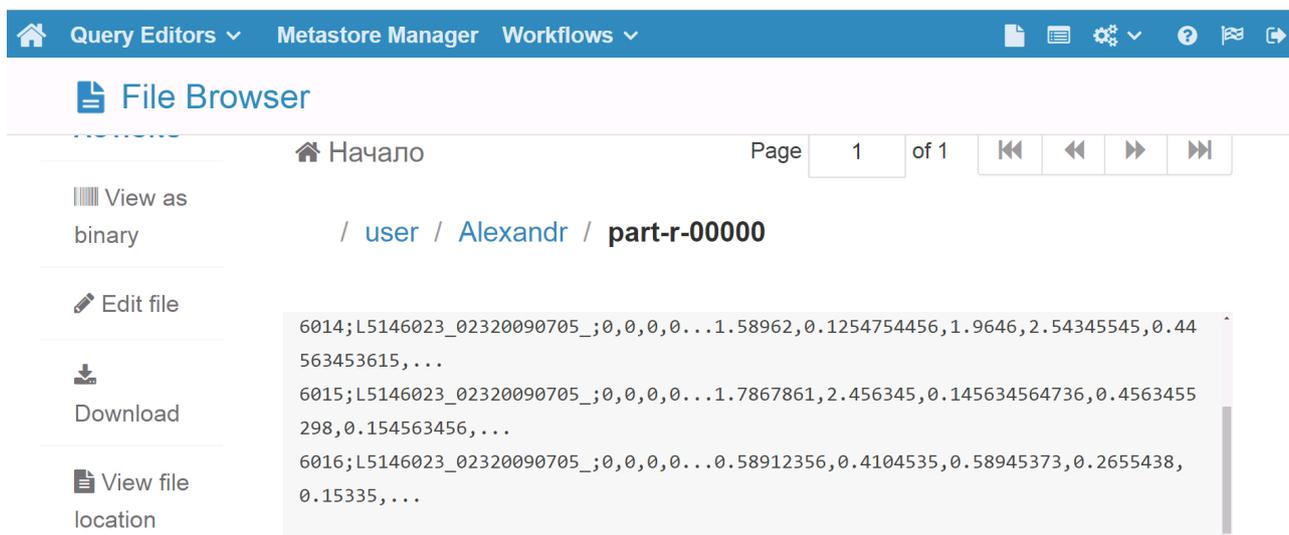


Рис. 3. Отображение примера результирующего формата данных (фрагмент веб-интерфейса ClouderaHue)

ной поток на кортежи данных по паре ключ/значение. На этапе Reduce происходит объединение целочисленных массивов согласно значениям ключа, и передача их на вход функции расчета индексов. Функция производит вычисление индексов и возвращает массив, содержащий значения типа float в контекст этапа Reduce и записывает его в промежуточный файл, созданный узлом кластера Hadoop. Полученные результаты, изображенные на рис. 3, позволяют производить повторные вычисления программным методом MapReduce, так как они аналогичны формату входных бинарных файлов.

1. На этапе работы алгоритма сортировки и сохранения с заданным форматом, создаются бинарные файлы, которые содержат последовательные, в соответствии с ключом, выходные данные расчета конкретного индекса, перечислений значений с плавающей точкой;

2. По окончании работы алгоритма создания файлов-последовательностей, содержащих результирующие значения индексов, на выходе получаем набор бинарных файлов, которые объединяются в один, при помощи метода "merge" стандартного класса "FSDataOutput" проекта Apache Hadoop который на вход принимает значение, место

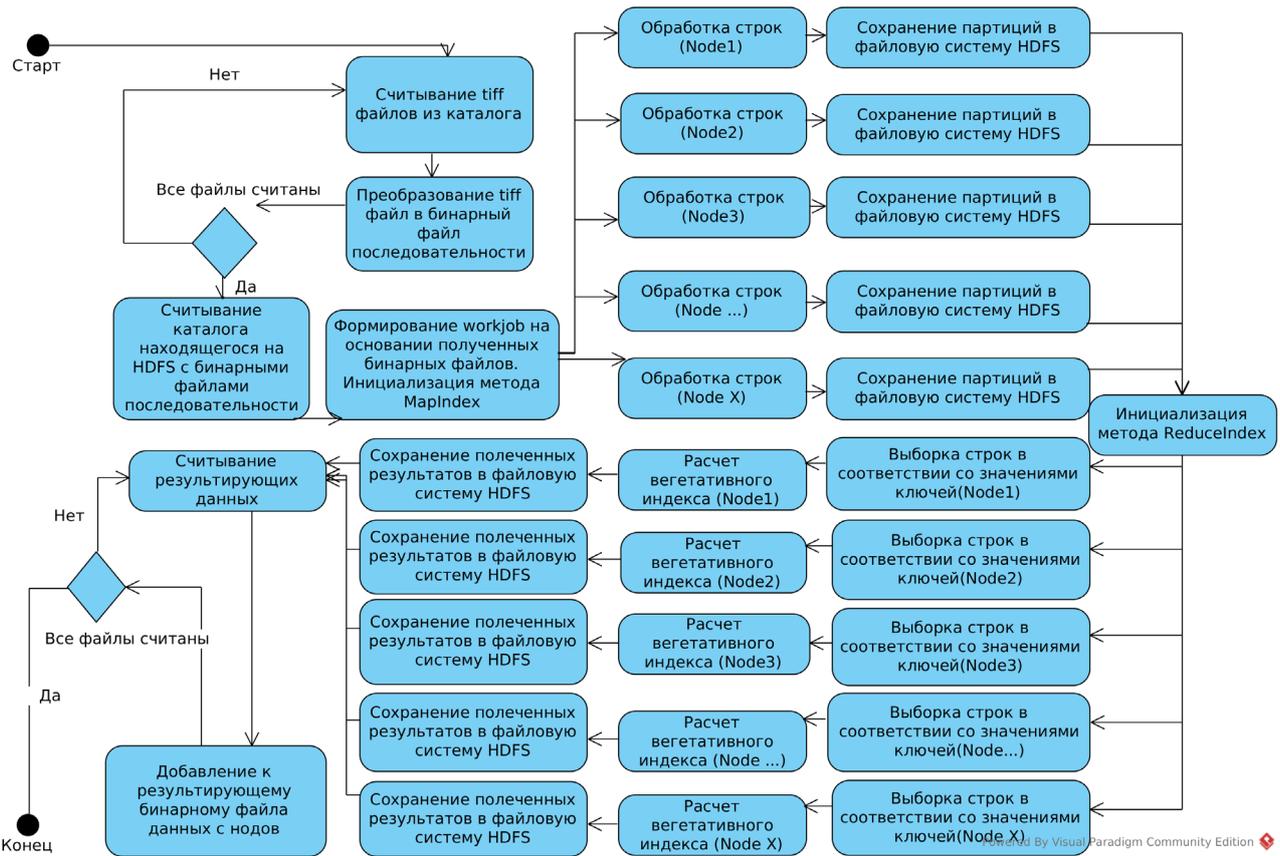


Рис. 4. Блок-схема взаимодействия компонентов системы при расчете вегетационного индекса NDVI

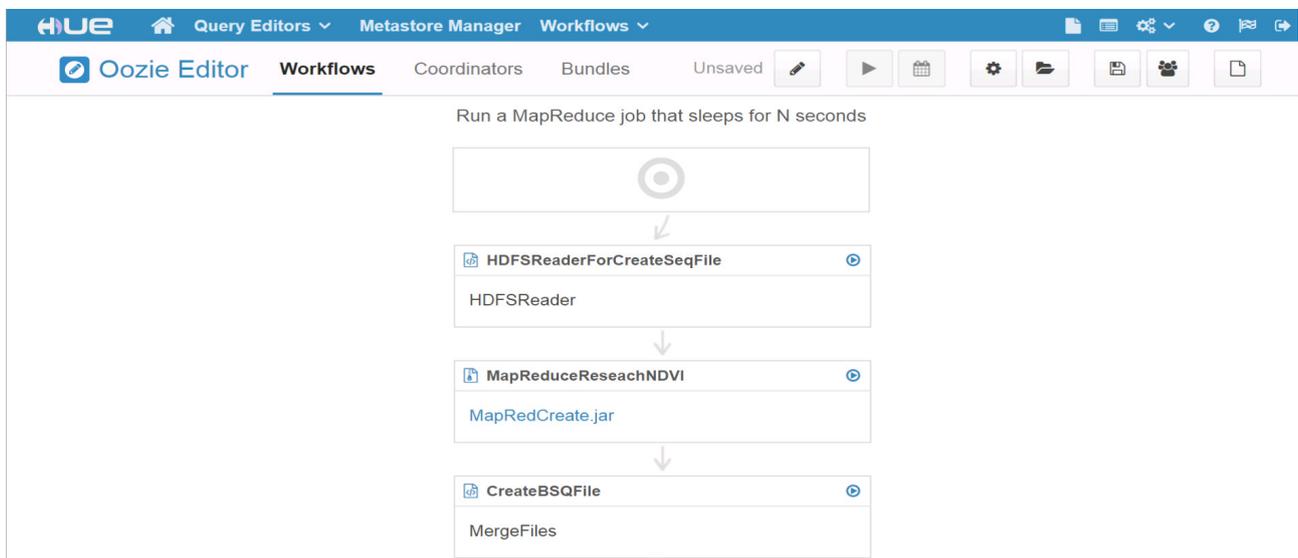


Рис. 5. Графический интерфейс workflow-задания для расчета индекса NDVI (фрагмент веб-интерфейса ClouderaHue)

расположение байтово присоединяемого бинарного файла и путь до результирующего файла.

3. Ниже представлена блок-схема, со взаимодействием всех разработанных модулей

информационной системы, на примере расчета вегетационного индекса NDVI.

На рис. 5 изображен графический интерфейс представления разработанных модулей обработки спектральных данных в виде

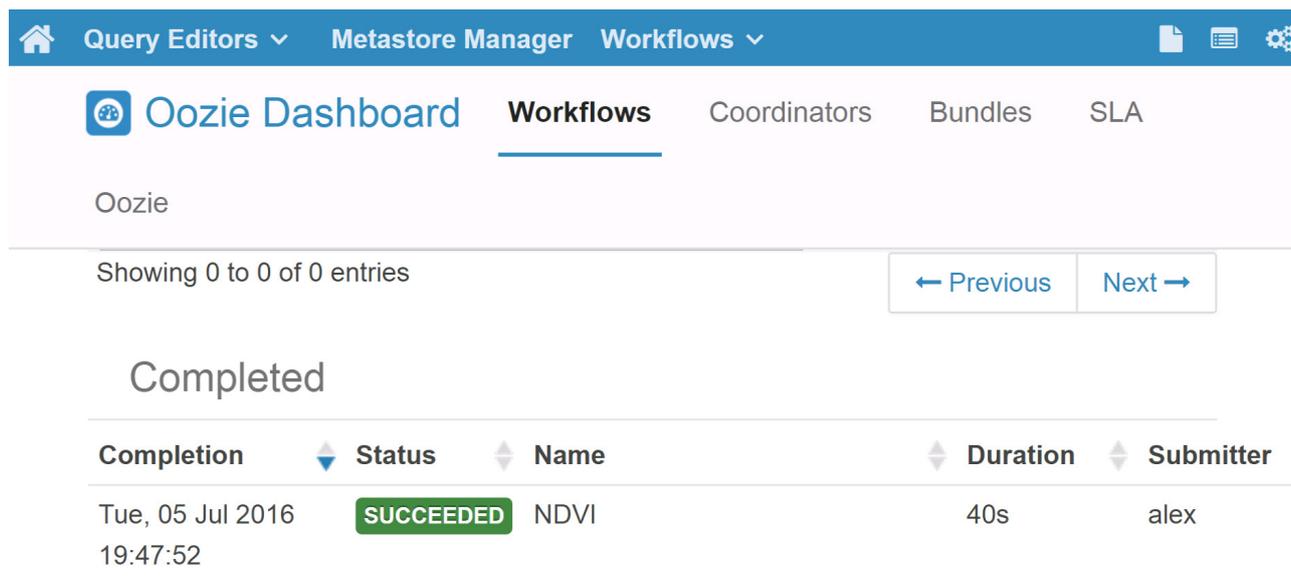


Рис. 6. Пример запуска задание расчета индекса NDVI в JobBrowser (фрагмент веб-интерфейса ClouderaHue)

Таблица 4

Частотный диапазон КА Landsat7/8

№ п/п	Канал	ETM+-сенсор	Пространственное разрешение ETM+- сенсора, м
1	Band_1 (Blue)	0,45-0,52	30
2	Band_2 (Green)	0,53-0,61	30
3	Band_3 (Red)	0,63-0,69	30
4	Band_4 (NIR)	0,75-0,9	30
5	Band_5 (SWIR-1)	1,55-1,75	30
6	Band_6 (TIR)	10,4-12,5	60
7	Band_7 (SWIR-2)	2,1-2,35	30
8	Band_8 (Pan)	0,52-0,9	15

интегрированных сервисов кластера Hadoop под управлением системы ClouderaHue, а также результаты их запуска в планировщике задания JobBrowser, с выводом информации о запросе к кластеру Cloudera CDH5 (затраченное время, номер задания, статус его выполнения) (рис. 6).

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

В качестве тестового примера были проведены расчеты следующих вегетационных индексов: нормализованного, инфракрасного, разностного, взвешенного, трансформированного. В качестве исходных данных использовались мультиспектральные вось-

миканальные снимки КА Landsat7/8 с пространственным разрешением 28,5 м размером 3800x2400 точек. Диапазон частот приведен в табл. 4.

Разработанный алгоритм протестирован в среде кластера Cloudera, содержащего восемь вычислительных узлов, между которыми распределилась нагрузка и в результате сократилось затраченное время вычисления относительно локальной конфигурации выполнения задачи. Результаты тестирования представлены на рис. 7.

Результаты тестирования показывают существенное повышение производительности в задачах попиксельного вычисления значений в точках спектральной светимости, за

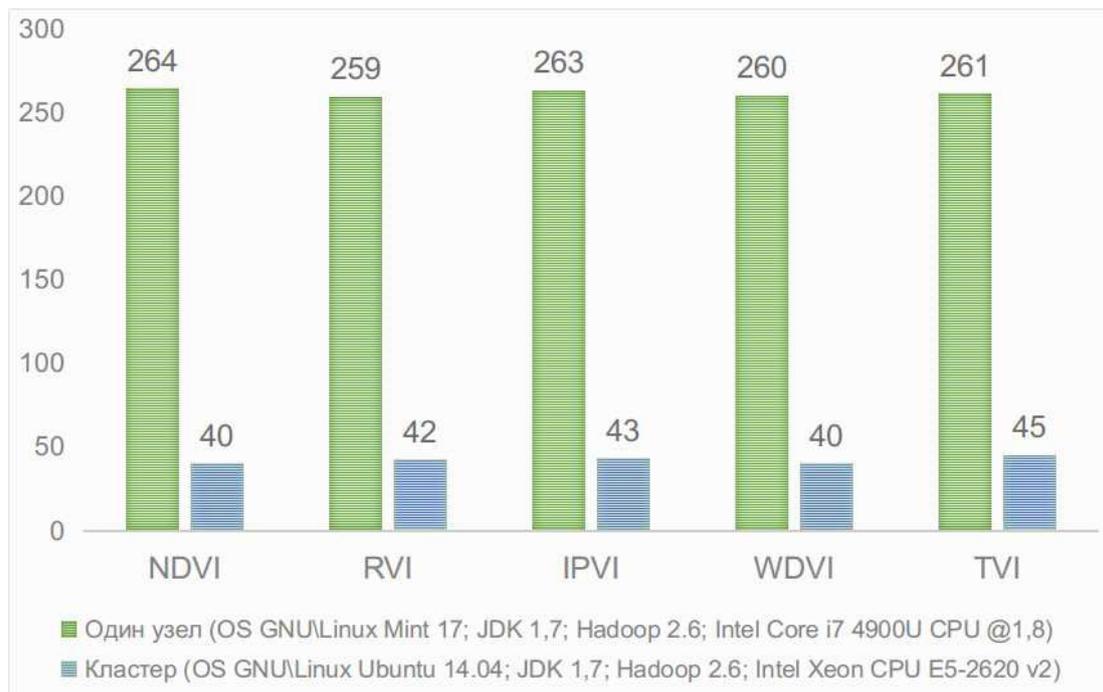


Рис. 7. Сравнительное время расчета вегетационных индексов

счет разделения массива данных на потоки в рамках заданий, запускаемых на отдельных узлах экосистемы Apache Hadoop. А также, закладывают возможность дальнейшего развития этапов распределенной обработки спектральных ДДЗ в массово-параллельных кластерных системах за счет применения вычислений и алгоритма кэширования их результатов в распределенной памяти, работающих узлов системы Apache Spark.

ВЫВОДЫ

В результате анализа различных подходов к распределенным вычислениям на базе массово-параллельных технологий, была выбрана современная экосистема Apache Hadoop, на основе которой создан высокопроизводительные вычислительные модули для расчета вегетационных индексов спектральных данных, как компонентов информационно-вычислительной ГИС-системы.

Так же для работы с каналами спутниковых снимков, содержащихся в файлах формата GEOTiff, разработан и адаптирован к работе с распределенной файловой системой HDFS высокопроизводительный алгоритм чтения/записи промежуточных бинарных пар ключ-значение для алгоритмов типа

MapReduce, с использованием библиотек JAI в среды кластера C oudera CDH5.

Проведены тесты производительности разработанных компонентов на примерах снимков космического аппарата andsat7/8. Результаты тестирования показали улучшенное время работы (в среднем в 5–6 раз) алгоритмов, по сравнению со стационарным хостом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манн К., Джонс М. Т. Распределенные вычисления с помощью Linux и Hadoop / К. Манн. – Режим доступа: <http://www.ibm.com/deve operworks/ru/library/ hadoop>.
2. Гербер Р. (Intel). Эффективное распределение нагрузки между потоками с помощью OpenMP* / Р. Гербер. – Режим доступа: <https://software.Intel.Com/ru-ru/ articles/more-work-sharing-with-openmp>.
3. Итицковитц М., Мазуров О., Нава К. An OpenMP Runtime API for Profiling / Sun Microsystems. – Режим доступа: <http://www.oracle.com/technetwork/server-storage/solaris10/omp-api-141059.html>.
4. Постолатий В. Распределенные вычисления с помощью Linux и Hadoop. / В. Постолатий. – Режим доступа: <http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/ hadoop/index.html>

5. Черепанов А. С. Вегетационные индексы / А. С. Черепанов // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 98–102.

6. Дудкин А. А. Подсистема параллельной обработки изображений для мониторинга состояния лесных угодий / А. А. Дудкин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – С. 129–138.

7. Shvachko K. Apache Hadoop. The Scalability Update // Login. – 2011. – V. 36, № 3. P. 7–13.

8. Уайт Т. Hadoop. Hadoop: The Definitive Guide. – СПб. : Питер, 2013 – С. 435.

9. Aaftab Munshi, Benedict R. Gaster, Timothy G. Mattson, James Fung, Dan Ginsburg. OpenC Programming Guide. Professional, New York: Addison-Wesley, 2011. – P. 158.

10. Оленев Н. Н. Основы параллельного программирования в системе MPI. – М. : ВЦ РАН, 2005.

Ощепков А. Ю. – магистр технических наук, аспирант Института вычислительных технологий СО РАН.
E-mail: aosivt@gmail.com

Oshchepkov A. U. – Magister of Technical Sciences, Aspirant, Institute of computational Technologies SB RAS (Kemerovo Branch).
E-mail: aosivt@gmail.com

Попов С. Е. – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института вычислительных технологий СО РАН.
E-mail: popov@ict.sbras.ru

Popov S. E. – PhD, Senior Researcher, Institute of computational Technologies SB RAS.
E-mail: popov@ict.sbras.ru