

УДК: 004.77:004.62:004.9

Проблема обработки и хранения больших объемов научных данных и подходы к ее решению

Исаев Е.А.^{*1,3}, Корнилов В.В.^{2,3}

¹Пушчинская Радиоастрономическая обсерватория Астрокосмического центра ФИАН, Пушчино, Московская область, 142290, Россия

²Институт математических проблем биологии, Российская академия наук, Пушчино, Московская область, 142290, Россия

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 101000, Россия.

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема значительного роста объёмов данных, получаемых, хранимых и обрабатываемых в ходе научной деятельности, в первую очередь в таких областях как биоинформатика и астрофизика. Рассматриваются современные программные методы и компьютерные технологии, используемые для работы со сверхбольшими объёмами данных. Проводится анализ состояния дел в институтах Пушчинского научного центра РАН – Институте математических проблем биологии РАН и Пушчинской радиоастрономической обсерватории Астрокосмического центра ФИАН им. Лебедева.

Ключевые слова: большие данные, биоинформатика, физика элементарных частиц, астрофизика, облачные вычисления, центр обработки данных, компьютерные системы обработки больших данных, компьютерный кластер.

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Революционные достижения в области электроники, компьютерных и информационных технологий за последние годы привели к тому, что одной из главных тенденций развития современной науки является существенное увеличение объёмов экспериментальных данных и связанные с этим проблемы их хранения и обработки. В последнее время в мировой науке намечается тенденция создания экспериментальных установок нового поколения; в научных экспериментах, таких как регистрация метеорологических данных, задачи математической биологии или астрономические наблюдения, генерируются огромные массивы данных. Например, один только архив телескопа «Хаббл», накопленный за 15 лет, занимает около 25 Тбайт. Лавинообразно растёт число разного рода научных публикаций, в том числе и в первую очередь исключительно «электронных», т.е. публикуемых только на веб-страницах авторов, а также различной «служебно-научной» документации: отчеты о проделанной работе, результатах проектов, персональная информация научных сотрудников, технологии, патенты, программы фондов, экспертные оценки и т.п. [1]. В качестве примера приведём полнотекстовый архив журнальных статей биомедицинского и биологического профиля (PubMed Central, PMC) Национальной библиотеки медицины Национального института здравоохранения США (NIH/NLM), который на текущий момент содержит 2,5 миллиона статей [2]. Отдельной проблемой становится поиск

* is@itaec.ru

партнеров по организации научной деятельности с целью формирования научных коллективов, возможно состоящих из множества распределенных групп, а также использование и экспорт созданных технологий и результатов научной деятельности. Таким образом, сегодня мы приходим к пониманию того, что дальнейшее продвижение в познании мира возможно только при обеспечении возможности обработки сверхбольших массивов информации.

Традиционно под термином «большие данные» (Big Data) считаются наборы данных настолько большого объёма и сложности, что стандартные инструменты по работе с базами данных оказываются не способны осуществлять их захват, хранение, управление и обработку за приемлемое для практики время [3]. Более широко этот термин можно трактовать как серию подходов, инструментов и методов обработки структурированных и неструктурированных данных огромных объёмов и значительного многообразия с целью получения человеко-читаемых результатов, которые эффективны в условиях непрерывного прироста данных и распределения их по многочисленным узлам вычислительной сети, альтернативных традиционным системам управления базами данных [4]. В качестве определяющих характеристик для больших данных принято отмечать «три V»: Volume – объём, в смысле большой величины физического объёма данных, Velocity – скорость, в смысле как скорости прироста необработанных данных, так и необходимости их высокоскоростной обработки и получения результатов анализа в реальном масштабе времени, Variety – разнообразие, в смысле возможности обработки различных типов неструктурированных и слабоструктурированных данных [5].

Впервые термин «большие данные» был введён Клиффордом Линчем, редактором журнала Nature, подготовившим в 2008 году специальный номер журнала на тему «Как могут повлиять на будущее науки технологии, открывающие возможности работы с большими объёмами данных?» [6]. В этом номере были подобраны материалы, иллюстрирующие проблему значительного увеличения объёма научных данных, их многообразия и возможных перспектив их использования в научном познании.

Роль данных в науке всегда оценивалась достаточно высоко, но особую актуальность проблема регистрации, обработки и анализа научных данных приобрела с развитием «вычислительной науки» – подходе, предполагающим широкое использование самых последних достижений информатики и вычислительной техники для решения задач в своей области знаний. Как следствие, заметно меняются и сами научные методы. Так, в последнее время стало популярным представлять не только полученные конечные результаты, но и так называемые «сырые» экспериментальные данные, с возможностью повторной обработки ранее накопленных массивов информации. И снова мы сталкиваемся, с одной стороны, с проблемой архивного хранения сверхбольших объёмов информации и с другой стороны, с необходимостью организации сервиса по поиску, распространению и предоставлению пользователю требуемой информации.

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ, ПРОЕКТЫ И УСТАНОВКИ, ГЕНЕРИРУЮЩИЕ БОЛЬШИЕ ОБЪЁМЫ ДАННЫХ

Приведём несколько примеров научных направлений, установок и проектов, генерирующие сверхбольшие объёмы данных.

Медицина и биология

Современные исследования в области медицины, биологии и генетики тесно связаны с новейшими достижениями в области информационных технологий и в основном базируются на обработке больших наборов цифровой информации. Наиболее остро проблема необходимости анализа сверхбольших объёмов данных наблюдается в

биоинформатике, в работах по ДНК-секвенированию для анализа генетических последовательностей. Проект по расшифровке генома человека, главной целью которого было определить последовательность нуклеотидов, которые составляют ДНК и идентифицировать около 25 тыс. генов в человеческом геноме, потребовал около 10 лет и более 5 млрд. долл. [7]. К сегодняшнему дню стоимость секвенирования значительно сократилась и составляет несколько тысяч долларов, а через несколько лет анализ генома станет настолько доступен, что его можно будет уже использовать повсеместно в научной и медицинской практике, например, предоставляя врачу возможность работы с информацией о геноме конкретного человека для извлечения данных, необходимых в процессе его лечения [8]. Уже в ближайшее время в биоинформатике ожидается массовое появление результативных данных от проектов по секвенированию ДНК тысячи отдельно взятых людей, позвоночных, насекомых и микроорганизмов. При этом уменьшение стоимости секвенирования и, как следствие, увеличение объемов генерируемых данных, происходит заметно быстрее чем растут вычислительные мощности компьютеров и ёмкости систем хранения данных (рис. 1). Например, объём первичных данных, получаемых современными методами при изучении микробных сообществ в 1 грамме почвы превышает таковой у всего проекта «геном человека» в тысячу раз [9]. Все чаще исследователи сталкиваются с тем, что объём данных на выходе секвенатора, содержащих информацию об отдельных участках генома настолько велик, что проблемой становится не только их обработка, но и простая запись на информационный носитель; традиционные алгоритмы анализа данных не справляются с поставленными перед ними задачами. Проблемой становится даже передача копии данных в другую лабораторию. Таким образом, в биоинформатике и биомедицине сегодня остро ощущается необходимость новых программно-технических средств, опирающихся на методы анализа больших объемов данных [10].

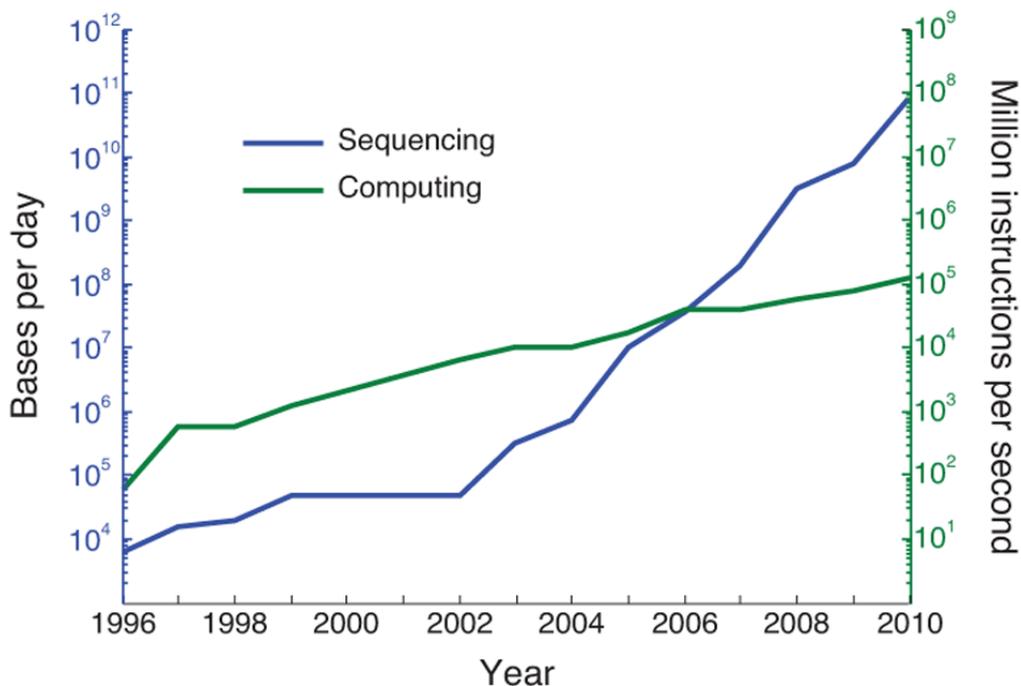


Рис. 1. Скорость роста вычислительных мощностей компьютеров (зеленый) и новых последовательностей ДНК (синий) [11].

Информатика оказала серьезное влияние на системную биологию, использующую методы математического моделирования для прогнозирования поведения сложных биологических систем, например имитации роста опухолей. В настоящее время активно развиваются инструментальные средства, позволяющие получать данные об

интенсивности работы генов (в зависимости от ткани, внешних воздействий и т.п.), о белок-белковых взаимодействиях, взаимодействиях белков и ДНК, влияющих на работу генов, о функциональных проявлениях полного выключения генов и т.п. Анализируя получаемые в результате колоссальные объемы информации можно получать детальные описания как жизни клетки в целом, так и механизмов работы отдельных ее компонентов (функциональных подсистем) и наоборот, тканей или бактериальных сообществ.

Ожидается, что прогресс в вычислительных и геномных технологиях приведет к беспрецедентным инновациям в персонализированной медицине. Национальный институт онкологии США определяет персонализированную медицину как "форму медицины, использующую информацию о генах, белках и окружающей того или иного человека среде для профилактики, диагностики и лечения болезни" [12]. Персонализированная медицина технически будет зависеть от электронной медицинской карты, содержащей подробные данные о пациенте, собираемые из самых разных источников, от рентгеновских снимков до телеметрии с имплантируемых устройств, таких как кардиомониторы. Возможность проводить анализ больших наборов медицинских данных позволит открыть новые виды лечения и лучше понять природу заболеваний. Медицинские исследования, опирающиеся на математическое моделирование и высокоскоростные вычисления над большими объемами данных могут не только значительно поднять уровень качества медицинского обслуживания, но и привести к снижению его стоимости. Превращая сырые цифровые данные в знания, врачи смогут более обоснованно применять доказательную медицину. Понятно, что для того, чтобы расшифровать и обработать персонализированные медицинские записи на основе биологических образцов необходимы интенсивные вычислительные ресурсы, а для хранения и передачи огромной совокупности медицинских данных требуются новые технологии. Здесь предстоит ещё решить немало технических проблем: обеспечение доступа к данным, связь существующих источников данных, создание эффективных инструментальных средств анализа больших объёмов медицинской информации, позволяющих делать содержательные выводы [13].

Еще одна важная задача из области компьютерной биологии для решения которой в настоящее время необходимо научиться работать с «большими данными» – это создание и сопровождение баз данных и знаний. Это могут быть как специализированные базы белковых структур, нуклеотидных последовательностей генов, метаболических путей передачи сигнала, клеточных ансамблей и т.п., так и библиотеки научных публикаций. Число и объёмы подобных баз данных стремительно растут, особенно в последние годы. Работа с такими огромными массивами информации требует создания принципиально новых подходов к обработке данных и соответствующего программного обеспечения. Весьма популярными становятся специализированные машины поиска и базы данных, в свою очередь содержащие упорядоченные сведения по тем или иным специализированным базам данным. Свой вклад в решение этой проблемы вносит Институт математических проблем биологии (ИМПБ) РАН, уже в течение ряда лет развивающий ресурс «Объединенный центр вычислительной биологии и биоинформатики» [14]. В частности, здесь созданы и поддерживаются в актуальном состоянии сведения о различных биоинформационных и молекулярно-биологических базах данных, организованные в виде структурированных и упорядоченных списков аннотированных ссылок, а также оригинальные базы данных, разработанные сотрудниками института. Возможно, что идеальным решением означенной проблемы стало бы создание единой базы данных, включающей в себя все существующие знания по физико-химической биологии. Понятно, что масштаб такой задачи огромен, но стремительное развитие вычислительной техники и методов обработки и анализа сверхбольших массивов информации даёт основания для осторожного оптимизма.

Физика элементарных частиц

В качестве примера рассмотрим самую крупную экспериментальную установку в мире – большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider, LHC) – ускоритель заряженных частиц на встречных пучках, предназначенный для разгона протонов и тяжёлых ионов (ионов свинца) и изучения продуктов их соударений (рис. 2). Коллайдер построен в научно-исследовательском центре Европейского совета ядерных исследований (CERN), на границе Швейцарии и Франции, недалеко от Женевы.

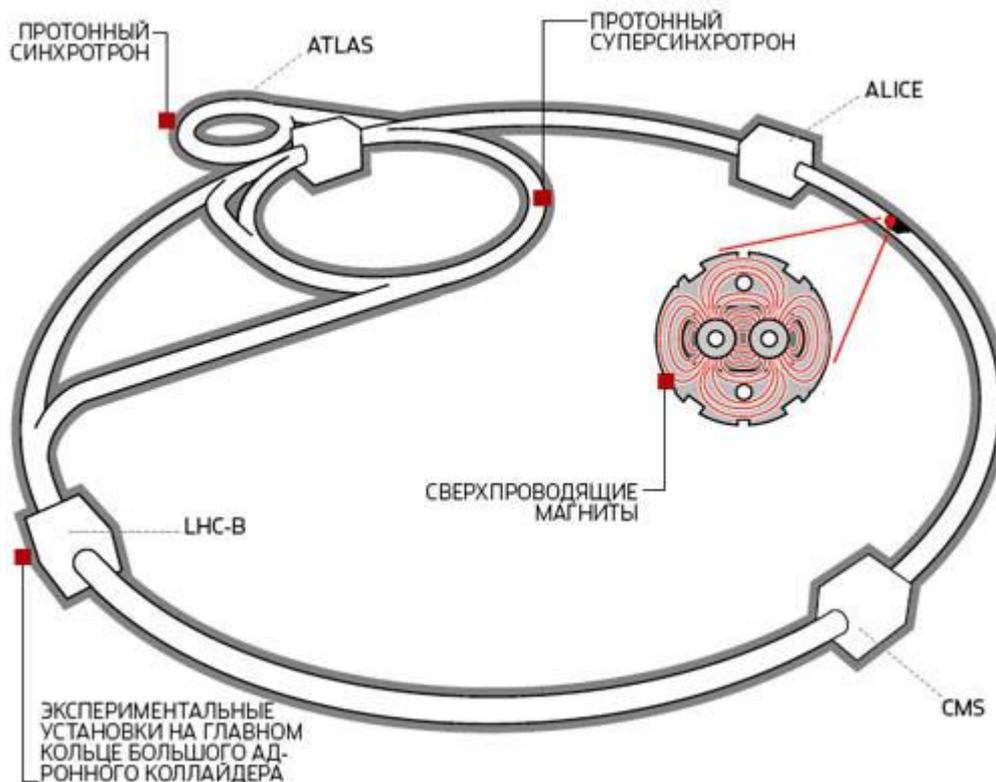


Рис. 2. Большой адронный коллайдер [Популярная механика. 2007. №11].

Столкновения частиц фиксируются в детекторах коллайдера миллионами датчиков, при этом генерируются огромные массивы данных. Детекторы LHC должны быть способны зафиксировать «портрет» события, определив траектории частиц, их типы, заряды, энергию. В 2010 году в общей сложности в ходе экспериментов было произведено 13 петабайт данных [15]. С 2011 года объемы данных, генерируемых LHC, увеличивались темпами, которые превышали самые смелые прогнозы. Сейчас объем информации, производимый всеми четырьмя детекторами коллайдера при проведении экспериментов по столкновению ионов тяжелых металлов, превышает 1 гигабайт в секунду [16]. Понятно, что собрать и переработать такой объем информации обычными средствами невозможно, так как даже после предварительной фильтрации в CERN остается храниться до 25 Пбайт данных в год. Для анализа этого гигантского объема информации используется распределенная компьютерная сеть.

Астрофизика

Когда в рамках проекта Слоановский цифровой обзор неба (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) (проект широкомасштабного исследования изображений и спектров звезд и галактик, использующий 2,5-метровый широкоугольный телескоп в обсерватории Апаچی-Пойнт, Нью-Мексико) в 2000 году был начат сбор астрономических данных, то только за первые несколько недель данных было накоплено больше, чем ранее за всю историю астрономических наблюдений.

Продолжая собирать данные со скоростью около 200 Гб в сутки, к настоящему времени SDSS накопил более чем 140 терабайт информации [17].

Ещё более амбициозный проект – Большой обзорный телескоп (Large Synoptic Survey Telescope, LSST), широкоугольный обзорный телескоп-рефлектор, предназначенный для съёмки доступной области неба. Когда LSST вступит в строй, предполагается получать такое же количество данных, как накоплено SDSS за два года его работы, за каждые пять дней (6,4 Гб данных каждые 15 секунд, около 5 петабайт за год) [18]. Поэтому эффективный и интеллектуальный анализ огромного количества данных на выходе телескопа, как ожидается, будет наиболее технически сложной частью проекта [19]. Первоначальные требования к вычислительному центру оцениваются в 100 терафлопс вычислительной мощности и 15 петабайт для хранения данных с увеличением по мере получения новой информации [20].

Проект LOFAR (LOW Frequency ARray — «низкочастотная антенная решётка») предполагает создание интерферометрической решетки из радиотелескопов, расположенных по всей Европе и соединенных вместе при помощи оптоволоконных линий связи [21]. Сигнал с антенн оцифровывается, передается в центральный процессор и обрабатывается программным обеспечением для картирования неба. Главный компьютер Blue Gene/L, один из самых скоростных в мире, уже работает в университете в Гронингене (Нидерланды). Его скорость 27 терафлопов достаточна для преобразования данных объемом 500 Гбит в секунду, непрерывно поступающих от станций, в радиоизображения в режиме реального времени. Объем памяти в 1 Петабайт позволяет проводить и последующую обработку сигналов.

В 2016 году запланировано начало строительства крупнейшего в истории радиотелескопа SKA (Square Kilometre Array) [22]. Ядро телескопа будет состоять из трех тысяч тарелок диаметром 15 метров, при этом будет использоваться технология, позволяющая объединить приемные площади отдельных радиотелескопов в одну общую площадь размером в один квадратный километр. Начать наблюдения планируется к 2019 году, а выход на полную мощность к 2024 году. Утверждается, что с помощью SKA можно будет на расстоянии в 50 световых лет уловить излучающие сигналы мощностью, сравнимой с сигналом обычных радаров, используемых в аэропортах. Особое место в структуре SKA занимает обработка данных. Тарелки супертелескопа будут выдавать информацию, по объему равную всему интернет-трафику. В сутки будет требоваться сохранять до 1 петабайта сжатых данных. Огромные технологические проблемы содержит в себе и обработка этого сверхбольшого потока данных. Для достижения запланированных параметров, станции SKA должны быть связаны широкополосными оптоволоконными линиями связи со скоростью передачи 160 Гбит в секунду, а мощность центрального компьютера должна быть порядка 100 петафлопов.

Свой вклад в создание «больших данных» вносит и Пуцинская радиоастрономическая обсерватория Астрокосмического центра ФИАН им. Лебедева (ПРАО АКЦ ФИАН), которая располагает тремя радиотелескопами, каждый из которых является одним из лучших инструментов в своей нише. Радиоастрономические комплексы являются весьма действенным и востребованным инструментом для исследования космоса. Прогресс приемно-регистрирующей аппаратуры постоянно улучшает эффективность использования радиотелескопов, но одновременно, значительно увеличивает объёмы регистрируемых данных. Наибольшие объёмы генерируются при исследовании пульсаров. На рис. 3 показана эволюция размера файла, получаемого в результате записи одного пульсара за 1 сеанс наблюдений с 80-х годов прошлого века по настоящее время [23].

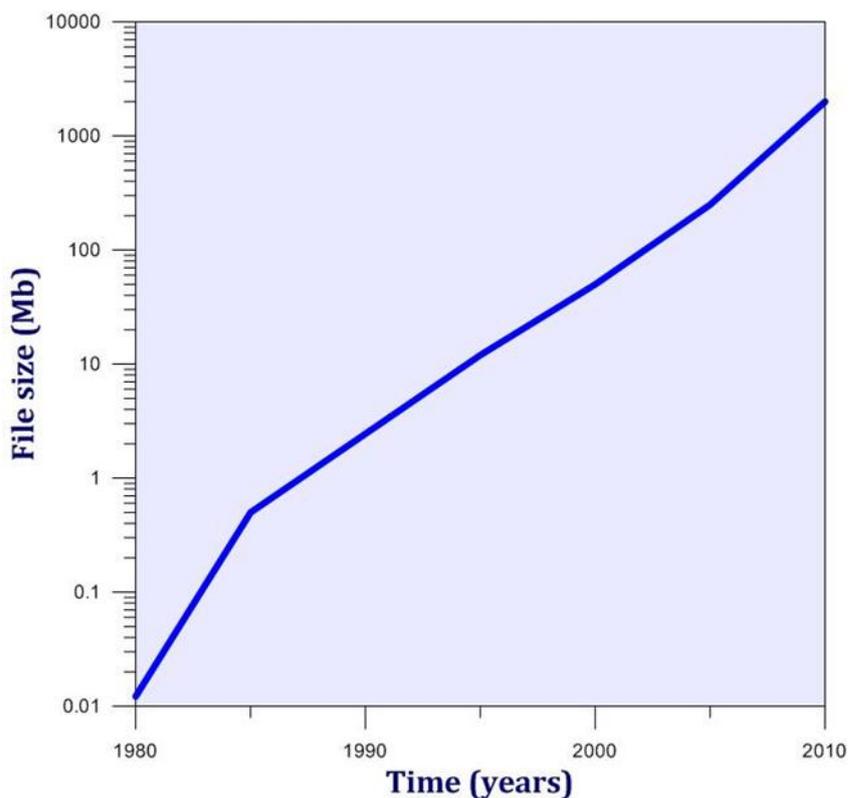


Рис. 3. Эволюция размера файла записи 1 пульсара за 1 сеанс наблюдений [23].

Не менее ресурсоемкими являются наблюдения и по другим научным направлениям. Поток первичных данных, собираемых всеми приёмными устройствами радиотелескопов ПРАО АКЦ ФИАН в настоящее время достигает нескольких десятков гигабайт в сутки, а с развитием проекта «РадиоАстрон» [24], в котором ПРАО АКЦ ФИАН принимает самое активное участие, суточная порция данных станции слежения превышает один терабайт.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

В настоящее время технология управления «большими данными» развивается под давлением парадигмы "облачных вычислений" ("cloud computing"), которая предполагает обеспечение удаленного динамического доступа пользователей к услугам, вычислительным ресурсам и приложениям (включая операционные системы и инфраструктуру) через интернет. Вычислительные облака могут состоять из тысяч серверов, размещенных в центрах обработки данных (ЦОД) провайдеров данных услуг, и обеспечивать независимую работу десятков тысяч приложений, которые одновременно используют миллионы пользователей.

Невозможность совместно использовать массивные объёмы данных, является одной из самых больших проблем, стоящих в настоящее время перед исследователями. В самом деле, при необходимости анализа данных, объем которых может измеряться петабайтами, даже простая передача их по сети, например, из одного исследовательского центра в другой, не может быть эффективно реализована с приемлемой скоростью, даже с помощью очень производительных сетей. Хотя следует заметить, что и прогресс развития сетевых технологий не стоит на месте. Так, сообщается о вводе в эксплуатацию высокоскоростной сети со скоростью передачи данных в 100 гигабит в секунду (Gbps), предназначенную для исследований и

образования, и о перспективах создания сетей со скоростью передачи данных в 1000 Gbps (1 Tbps) [25]. Новая сеть, названная Monon100, в 10 раз быстрее, чем используемая сейчас технология 10GBASE, предназначенная для передачи данных на скорости до 10 Gbps. Monon100 обеспечит доступную высокоскоростную связь между университетами в Индиане (США), увеличивая возможности учёных и исследователей, которые смогут совместно использовать массивные объёмы данных, и, обеспечивая новые возможности для сотрудничества, которое сможет в свою очередь привести к новым открытиям в науке и медицине. “Сеть с такой скоростью, как Monon100, резко улучшает способность исследователей обработать очень большие объёмы данных”, - сказал Дэвид Жан (David Jent), вице-президента Ассоциации сетей Университета Индианы. “Огромные объёмы информации весьма характерны для таких исследований, как человеческий геном и изучение изменений климата, в которых данные исчисляются петабайтами. Чтобы передать такой объём информации на нашем нынешнем сетевом соединении потребуется 10 или 11 дней. На Monon100 потребуется немногим более суток”.

Тем не менее, при работе с «большими данными» сейчас невозможно собрать все данные в одном месте, а потом их анализировать. Поэтому данные остаются на своих местах, а роль облачных технологий состоит в их анализе, путём выборки из различных мест хранения и использования для их обработки необходимой вычислительной мощности. Таким образом, облачные технологии, с одной стороны должны сделать возможным сбор и хранение гигантских массивов информации, а с другой – представлять необходимые процессорные мощности для обработки этих самых объёмов данных. Немаловажными характеристиками облачных технологий являются требования к эффективности использования оборудования и необходимости обеспечения совместного доступа множества пользователей к распределённым данным [26].

Следует отметить, что предполагаемое разнообразие устройств, используемых в облачных вычислениях, радикальным образом уменьшают стоимость вычислительных мощностей и средств хранения информации. Уменьшающаяся стоимость распределённых вычислений, памяти и систем хранения фундаментально меняют экономику обработки данных. Стоимость 1 Тб в современных хранилищах данных более чем в половину меньше, чем три года назад, а облачные хранилища данных предлагают десятикратное преимущество по совокупной стоимости владения по сравнению с традиционными системами. Пока цена вопроса для научных организаций всё ещё высока, хотя стоимость хранения данных продолжает падать, и не исключено, что через несколько лет стоимость станет приемлема и для бюджетных организаций.

Наиболее популярной в настоящее время моделью работы с «большими данными» является разработанный фондом Apache Software Foundation [27] проект Apache Hadoop, свободно распространяемый набор утилит, библиотек и программный каркас для разработки и выполнения распределённых программ, работающих на кластерах из сотен и тысяч узлов [28, 29]. Идея проекта заключается в использовании для хранения и обработки данных большого количества вычислительных узлов, объединяемых распределённой файловой системой Hadoop Distributed File System (HDFS), при этом в отличие от стандартных вычислительных решений именно программы обработки передаются к данным, хранимым на узлах кластера. Возможность параллельной обработки данных реализована в программном интерфейсе MapReduce, согласно которому приложение разделяется на большое количество одинаковых элементарных заданий, выполняемых на отдельных узлах кластера и естественным образом сводимых в конечный результат [30]. Преимущество MapReduce перед традиционными методами обработки данных заключается в том, что этот метод позволяет распределённо производить все основные операции с данными. Операции предварительной обработки (получение центральным узлом кластера входных данных задач, разделение их на части

и передача для обработки другим вычислительным узлам) работают независимо друг от друга и могут производиться параллельно. Аналогично, множество рабочих узлов могут осуществлять свертку (процесс получения главным вычислительным узлом системы результатов обработки данных от рабочих узлов и формирования на их основе окончательного решения задачи). Для этого необходимо, чтобы все результаты предварительной обработки обрабатывались одним рабочим узлом в один момент времени. Хотя этот процесс может быть менее эффективным по сравнению с более последовательными алгоритмами, MapReduce может быть применен к большим объемам данных, которые могут обрабатываться большим количеством серверов. Параллелизм также дает некоторые возможности восстановления после частичных сбоев серверов: если в рабочем узле, производящем операцию предварительной обработки или свертки возникает сбой, то его работа может быть передана другому рабочему узлу (при условии, что входные данные для проводимой операции доступны).

Реализованная в проекте Hadoop технология работы с данными коренным образом отличается от традиционных реляционных систем управления базами данных (СУБД), предназначенных для работы со структурированными данными. Новые методики обработки больших объемов неструктурированных данных часто объединяют под термином NoSQL (обычно расшифровывающийся как Not Only SQL). Им обозначают растущее семейство технологий работы с данными, которые можно в целом охарактеризовать следующими признаками, делающими их отличными от традиционных реляционных СУБД [31]: отсутствие поддержки SQL (языка структурированных запросов), работа с неструктурированными или слабо структурированными структурами данных, отсутствие механизмов обеспечения целостности данных в том виде как они реализованы в классических СУБД, техническая реализация обычно в виде распределенных систем с широкими возможностями горизонтального масштабирования, когда несколько независимых серверов соединяются скоростной системой обмена данными и каждый сервер обрабатывает только часть данных или только часть запросов к базе данных. В такой архитектуре для повышения мощности хранилища (емкости, времени отклика, пропускной способности) необходимо лишь добавить новый сервер в вычислительный кластер. В целом основное назначение NoSQL СУБД заключается в возможности обработки большого количества неструктурированных данных за нерегламентированное время, но с гарантированным результатом. В этом состоит принципиальное отличие NoSQL от традиционных СУБД, так как последние предполагают хранение информации в четко структурированном виде и гарантируют время выполнения операций. В статье [32] авторы приходят к заключению, что основное достоинство систем MapReduce в способности к быстрой загрузке и обработке данных большого объема в заранее непредвиденном режиме. В этом качестве технология MapReduce дополняет технологию традиционных СУБД, а не конкурирует с ней. Результаты, приведенные в работе [33] показывают, что параллельные СУБД работают значительно быстрее, чем системы MapReduce после того, как данные загружены, но загрузка данных в классических системах занимает гораздо больше времени.

Специализированные компьютеры для работы с «большими данными»

Рассмотрим, что именно представляют из себя вычислительные системы, предлагаемые ведущими производителями компьютерной техники в качестве узлов кластеров центров обработки данных, предназначенных для построения облачной инфраструктуры для хранения и работы с «большими данными», и предоставляющие как возможности хранения больших объемов данных, в том числе распределенные, так и средства аналитики и параллельной обработки данных в реальном масштабе времени.

В статье, посвящённой анализу платформ обработки «больших данных» [34], рассматривается концепция идеальной платформы, полноценно решающей проблему «больших данных». Такое решение, по мнению автора, «должно обеспечивать возможность работы с данными всех типов и в произвольных форматах; иметь средства визуализации, обнаружения и представления в удобном для восприятия и поиска виде; включать инструменты аналитики, как в традиционном пакетном режиме, так и в режиме реального времени; предоставлять средства поддержки традиционных хранилищ данных и системы обработки потоков различных сведений без потерь времени на промежуточное хранение». Соглашаясь в целом с этими требованиями, отметим, что вероятно, компьютерные системы, которые мы приводим далее, не в полной мере отвечают всем заявленным характеристикам, но это лучшие решения для работы с «большими данными» из существующих на сегодняшний день. Специализированные компьютеры, предназначенные для аналитической работы с «большими данными», сегодня создают IBM, HP, SAP, Oracle, Teradata, Microsoft, EMC и другие мировые вендоры. Такие устройства в общих чертах представляют собой массивы хранения данных, снабженных дополнительными функциональными уровнями предварительной обработки и представления информации.

Корпорация Oracle после слияния с Sun разработала целую линейку таких продуктов. Впервые были созданы готовые вычислительные комплексы на основе специализированного программного и типового аппаратного обеспечения, оптимизированные для решения задач по обработке и хранению данных. Сначала появилась Exadata Database Machine – машина баз данных, предназначенная для кардинального повышения производительности работы баз данных. Следующей была выпущена Exalogic Elastic Cloud, оптимизированная для достижения максимальной скорости работы приложений и развертывания частных и публичных облаков. А недавно в продажу поступила «машина больших данных» Oracle Big Data Appliance, предназначенная для обработки огромных массивов неструктурированных данных. Важно, что во всех этих продуктах в единое целое объединены серверы, устройства хранения, сетевое оборудование и программное обеспечение. Они не требуют предварительной настройки и поставляются как полностью готовый к эксплуатации и простой в управлении программно-аппаратный комплекс. По сути- это своего рода «строительные блоки» для создания центров обработки данных нового поколения – инфраструктуры, необходимой для развития облачных услуг [35].

Компания SGI объявила о выпуске в продажу суперкомпьютера SGI UV 2 с общим количеством вычислительных ядер до 4096, объемом когерентной основной памяти до 64 терабайт и объемом общей памяти до восьми петабайт [36]. При пиковой скорости ввода-вывода до 4 терабайт в секунду и когерентной общей памяти, которая может работать в 1000 раз быстрее флэш-памяти, все эти функциональные возможности делают SGI UV самой мощной системой in-memory (концепция проведения вычислений в памяти) для всех задач, требующих обработки больших массивов данных. Таким образом, это идеальная платформа для ускорения инноваций в сферах поддержки принятия решений, геномики и биологических наук, химии и обработки материалов, физики, интегративной системотехники, национальной безопасности, проектирования изделий и в других областях, требующих обработки больших объемов данных. Центр геномного анализа (The Genome Analysis Centre, TGAC) и Центр биологических наук (Centre Biological Sciences, CBS) Датского технического университета, которые пользуются широким признанием каждый в своей области – секвенирования нового поколения и метагеномики соответственно – одними из первых начнут использовать SGI UV 2 в данных областях исследований.

Не осталась в стороне и корпорация IBM, объединившая все свои адекватные для этой сферы решения в единую платформу. В ее состав вошли: Netezza – специализированный программно-аппаратный комплекс на базе IBM x-Series,

поставляемый с предустановленной одноименной СУБД и предназначенный для построения аналитических приложений и хранилищ данных объемом свыше 1 Пбайт; nfoSphere BigInsights – решение по анализу и обработке неструктурированных данных на основе технологий Hadoop; InfoSphere Streams и Vivisimo – средство анализа потоковой информации и комплексной обработки больших объемов неструктурированных данных [37].

Компания Hitachi Data Systems предлагает два специализированных программно-аппаратных комплекса для решения задач построения систем хранения для Больших Данных: Hitachi Content Platform (HCP) — платформа для хранения контента, предназначенная для хранения и управления большими объемами неструктурированных данных и Hitachi Network Attached Storage (HNAS) — решение для обеспечения файлового доступа к данным, которое позволяет хранить и управлять большим количеством файлов [38]. HCP представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из узлов хранения на базе серверов x86 и внешней системы хранения общей емкостью до 40 Пбайт. Функционал платформы позволяет решать широкий спектр задач для хранения информации, обеспечения безопасности и доступности содержимого, а также создавать облачные хранилища и территориально распределенные файловые репозитории. Объектный подход к хранению контента, возможности по индексации больших объемов данных позволяют HCP работать с «большими данными» наиболее эффективно. Система хранения данных Hitachi Network Attached Storage — это интегрированное решение для работы непосредственно с локальной вычислительной сетью организации. Пользователи могут использовать HNAS для хранения своих документов и программ, а приложения (Microsoft Exchange Server, Microsoft SQL Server, Microsoft SharePoint, Oracle и др.) для хранения данных. Возможности динамического выделения пространства и иерархического хранения данных позволяют эффективно использовать дисковое пространство. Для пользователей это даёт ощутимый эффект при хранении и доступе к информации, а также при резервном копировании и восстановлении данных.

И в заключение данного краткого обзора представим специализированный компьютер корпорации EMC – Greenplum HD Data Computing Appliance. Новая модель обладает способностью получать информацию из «облаков» и работать с гигантскими массивами данных – эти качества обеспечивает встроенная в DCA поддержка интегрированной среды Hadoop [39]. В продукте EMC Greenplum HD DCA собраны вместе три главные технологии аналитической обработки больших объемов структурированных и неструктурированных данных: свободно распространяемая среда Apache Hadoop, СУБД EMC Greenplum Database 4.0 и аппаратная платформа EMC Greenplum HD DCA. От других спецмашин Greenplum HD DCA отличается интеграцией Hadoop с СУБД Greenplum, характеризуемой возможностью масштабирования до петабайт, эластичностью с точки зрения используемой аппаратной основы (серверы, СХД) и применимых аналитических методов. Стандартная модель DCA выпускается в трех модификациях: GP10 Quarter Rack, GP100 Half Rack и GP1000 Full Rack. В каждой из них есть два основных сервера (Master Servers) и 4, 8 или 16 рабочих серверов сегментов (Segment Servers) с общим числом процессорных ядер 48, 96 или 192 и с памятью 192, 384 или 768 Гбайт. В данной модели устанавливается 48, 96 или 192 дисков HDD SAS с некомпьютеризованной емкостью 9, 18 или 36 Тбайт и компьютеризованной емкостью 36, 72 или 144 Тбайт. Другая модель, High Capacity DCA (GP10C Quarter Rack, GP100C Half Rack и GP1000C Full Rack), ориентирована на большие объемы данных, но меньшую оперативность, поэтому отличается дисками: в ней устанавливаются 48, 96 или 192 дисков HDD SATA с некомпьютеризованной емкостью 31, 62 или 124 Тбайт и компьютеризованной емкостью 124, 248 или 496 Тбайт.

Обращает внимание тенденция на преимущественное использование в компьютерных платформах для работы с «большими данными» систем хранения

данных, напрямую присоединённых к вычислительным узлам (DAS, Direct-attached storage – устройства хранения данных, непосредственно подключаемые к серверу или рабочей станции без помощи сети хранения данных). Это могут быть и твердотельные дисковые системы (SSD) и массивы традиционных HDD дисков, подключаемых с использованием различных интерфейсов. Возвращение моды на использование DAS-решений, после практически полного их вытеснения сетевыми решениями для хранения данных классов NAS (Network Attached Storage, сетевая система хранения данных) и SAN (Storage Area Network, сети хранения данных) связывают именно с необходимостью работы с большими данными [40]. Неожиданный возврат к DAS стимулирован распространением приложений, основанных на распределенных базах данных, подобных Hadoop, где узлы кластера, поддерживающего такое приложение, могут подключаться к дисковому массиву посредством различных компьютерных интерфейсов (SATA, SAS, SCSI или Fibre Channel), но в любом случае напрямую, а не по сети. В общем случае архитектуры хранения SAN и NAS, позволяющие разделять данные или неиспользуемые ресурсы с другими серверами в сети, являются относительно более медленными, сложными и дорогими. Эти качества несовместимы с требованиями к системам анализа «больших данных», приоритетными для которых являются производительность системы, удобство инфраструктуры и низкая стоимость. Необходимость обеспечения скорости анализа данных работы в режиме реального времени требует минимизации задержек передачи данных везде, где это возможно. Отсюда приоритет систем с обработкой данных в памяти.

Технология GRID

В качестве альтернативы облачным технологиям для решения задач обработки больших объемов научных данных предлагается использование высокопроизводительных локальных кластеров научно-исследовательских центров и технология GRID [10]. Последняя представляет из себя концепцию, подразумевающую совместное использование научно-исследовательскими организациями своих вычислительных мощностей для интенсивных операций с научными данными. По своей сути, это разновидность распределённых вычислений, в которой вычислительные ресурсы различного типа объединяются вместе единой инфраструктурой для выполнения ресурсоемких заданий. Технология GRID успешно применяется для решения научных задач, требующих значительных вычислительных ресурсов. Преимуществом распределённых вычислений является то, что в качестве отдельных узлов GRID-системы могут использоваться даже обычные неспециализированные компьютеры. Таким образом, теоретически можно получить те же вычислительные мощности, что и на суперкомпьютерах, но с гораздо меньшей стоимостью. К сожалению, данная технология не подходит, когда возникает необходимость передачи для обработки на удалённый ресурс большого объёма информации из-за возможно недостаточной скорости передачи данных по имеющимся компьютерным сетям. Тем не менее, GRID-технология успешно применяется, например, для моделирования и обработки данных в экспериментах на уже упомянутом в данной статье Большом адронном коллайдере. Распределённая вычислительная система, предназначенная для обработки данных, получаемых с LHC, имеет иерархическую структуру. На верхнем уровне расположен собственно компьютерный центр CERN, который, несмотря на его мощность, располагает лишь 20% требуемых вычислительных ресурсов. Поэтому остальные данные распределяются для хранения и обработки между компьютерными центрами по всему миру, в том числе и российскими вычислительными центрами [16].

ИМПБ РАН также активно участвует в GRID-инфраструктуре, являясь членом консорциума РДИГ (Российский грид для интенсивных операций с данными - Russian Data Intensive Grid, RDIG). В рамках этой организации свои вычислительные мощности

для интенсивных операций с научными данными совместно используют целый ряд российских научно-исследовательских организаций в Москве, Санкт-Петербурге, Новгороде и подмосковных научных центрах. Консорциум РДИГ в свою очередь входит в структуру EGEE (Enabling Grids for E-sciencE, "Развёртывание гридов для развития е-науки") в качестве региональной федерации для обеспечения полномасштабного участия России в этом проекте. EGEE - это крупнейшая в мире грид-инфраструктура для выполнения задач в области многих дисциплин. В неё входят свыше 120 организаций. Они образуют надёжную и способную к расширению систему компьютерных ресурсов, доступных исследовательскому сообществу Европы и всего мира. Сейчас в ней участвуют 250 сайтов в 48 странах и более 68 тыс. компьютерных устройств; с ними могут работать круглосуточно 7 дней в неделю около 8 тыс. пользователей [41].

Компьютерные кластеры

Теперь рассмотрим наиболее традиционное из решений, используемое в настоящее время для работы с «большими данными», а именно локальные компьютерные кластеры научно-исследовательских центров. Традиционно кластером принято называть несколько связанных между собой высокоскоростными каналами связи компьютеров, используемых как единый вычислительный ресурс. Вычислительные кластеры позволяют существенно уменьшить время расчетов, по сравнению с одиночным компьютером, разбивая задание на параллельно выполняющиеся ветки, которые обмениваются данными по связывающей узлы кластера сети. При этом имеется возможность построения относительно высокопроизводительных комплексов из обыкновенных недорогих компьютеров на основе бесплатного программного обеспечения и простых сетевых технологий. Именно кластерные вычислительные системы в последнее время лидируют в рейтинге наиболее высокопроизводительных компьютерных систем TOP500; совсем недавно был опубликован очередной, 40 его выпуск [42]. Самым высокопроизводительным суперкомпьютером в мире, достигнувшем в тесте Linpack производительности в 17.59 Petaflop/s, признан построенный в Национальной лаборатории Оук-Ридж (США) компанией Cray кластер Titan [43]. Кластер включает в себя 18688 16-ядерных процессоров Opteron 2.200GHz и столько же вычислительных акселераторов на базе GPU NVIDIA Tesla K20x. Самый производительный из отечественных кластеров Lomonosov (МГУ им. М.В. Ломоносова) [44] за полгода переместился с 22 на 26 место в рейтинге. Всего в Top500 вошло 8 отечественных суперкомпьютеров, что на 3 больше, чем в прошлой редакции рейтинга [45]. Одновременно был опубликован пятый выпуск альтернативного рейтинга кластерных систем Graph 500 [46], ориентированного на оценку производительности суперкомпьютерных платформ, предназначенных прежде всего для решения задач по обработке больших массивов данных. В отличие от теста Linpack, который демонстрирует в основном вычислительные возможности суперкомпьютеров, не отражая скорость обработки массивов данных, рейтинг Graph 500 нацелен прежде всего на оценку производительности обработки экстремально больших объемов данных в таких областях применения высокопроизводительных систем, как информационная безопасность (криптография), медицинская информатика, биоинформатика, социальные и нейронные сети. Первые позиции в этом рейтинге занимают суперкластеры Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса (Калифорния, США) – 65536 вычислительных узлов, 1048576 процессорных ядер и Аргоннской национальной лаборатории (Иллинойс, США) – 32768 вычислительных узлов, 524288 ядер.

В Пущинском научном центре (ПНЦ) РАН на базе ИМПБ РАН также создан и успешно эксплуатируется высокопроизводительный компьютерный кластер (рис. 4),

предназначенный для выполнения ресурсоемких вычислений обширного круга задач фундаментальных исследований [47]. И хотя ему пока ещё далеко до первых позиций в мировых рейтингах (общая производительность кластера на текущий момент составляет порядка более 1 Тфлоп/с) кластер позволяет учёным ПНЦ успешно проводить работы в области математической биологии и биоинформатики [48].



Рис. 4. Вычислительный кластер ПНЦ РАН на базе Института математических проблем РАН.

В настоящее время вычислительный кластер состоит из вычислительных узлов двух типов: 9 двухпроцессорных вычислительных узлов на базе процессоров Intel Xeon X5650 (6 ядер, 2.66 ГГц) с 24 Гб оперативной памяти на узел и 12 двух процессорных вычислительных узлов на базе процессоров Intel Xeon E5620 (4 ядра, 2.40 ГГц) с 24 Гб оперативной памяти на узел. Суммарное количество вычислительных ядер – 204, объем оперативной памяти – 504 Гб. Вычислительные узлы связаны между собой коммуникационной сетью Mellanox Infiniband QDR, пропускная способность сети 40 Гб/сек, время передачи коротких сообщений порядка 1 - 7 мкс. Сеть передачи данных и сеть управления кластером построены на основе гигабитных управляемых коммутаторов D-Link DGS-3120. Для хранения данных текущих расчетов используется кластерная распределенная файловая система GlusterFS v3.3. Для хранения пользовательских данных используется быстрое дисковое хранилище сервера объемом 4 Тб (Adaptec 5805, raid10 из четырех дисков SAS). В ближайших планах для увеличения производительности кластера предусмотрено увеличение количества вычислительных узлов и модернизация внутренней сети кластера.

На ПРАО АКЦ ФИАН для целей архивирования и хранения данных используются несколько специализированных систем хранения. Дата-центр ПРАО АКЦ ФИАН включает в себя два сервера хранения данных емкостью по 24 и 48 Тбайт. Первый из них представляет собой буферный центр для резервного хранения научных данных, передаваемых с космического радиотелескопа по проекту «РадиоАстрон» на наземную станцию слежения РТ-22. Он состоит из сервера Kraftway Express ISP ES25 и системы хранения данных Kraftway Storage 200-12. Второй сервер предназначен для хранения

записей астрономических наблюдений с трех наземных радиотелескопов Пушинской радиоастрономической обсерватории, а также баз данных астрономических каталогов. Данный сервер управляется операционной системой Open-E Data Storage Software (DSS) V6, которая позволяет обеспечить доступ к хранимым данным по протоколам http, ftp, samba, nfs. Оба сервера смонтированы в монтажный шкаф APC NetShelter SX 42U 600mm Wide x 1070mm Deep Enclosure AR3100. Для передачи больших объемов информации (проект «РадиоАстрон») с наземной станции слежения РТ22 ПРАО АКЦ ФИАН в московский центр обработки данных АКЦ ФИАН [49] введен в эксплуатацию канал прямой оптической связи с пропускной способностью 1 Гбит/с.

Заключение

Анализируя тенденции развития современной науки, можно с уверенностью сделать вывод, что дальнейшее успешное развитие научно-исследовательских проектов возможно только в том случае, если научное сообщество научится работать со сверхбольшими объемами данных, анализировать их и находить в них новые знания. Одним из основных методов решения проблемы «больших данных» является использование «облачных вычислений», при помощи которых пользователи получают возможность удаленного доступа к массивам информации и использования распределённых вычислительных ресурсов для их обработки. При этом компьютерные комплексы, предназначенные для хранения и обработки массивов данных, могут располагаться в специализированных центрах обработки и хранения данных. Такие центры будут предназначены не только для удаленного хранения и резервного копирования большого объема научных данных, но и для удалённого доступа к приложениям, обеспечивающим анализ этих данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Howe D., Costanzo M., Fey P., Gojobori T., Hannick L., Hide W., Hill D.P., Kania R., Schaeffer M., St Pierre S., et al. Big data: the future of biocuration. *Nature*. 2008. V. 455. P. 47–50.
2. PMC - a free full-text archive of biomedical and life sciences journal literature at the U.S. National Institutes of Health's National Library of Medicine (NIH/NLM). URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/> (дата обращения: 10.02.2013).
3. MIKE2.0. The open source standard for Information Management. Big Data Definition. URL: http://mike2.openmethodology.org/wiki/Big_Data_Definition (дата обращения: 10.02.2013).
4. Manyika J., Chui M., Brown B., Bughin J., Dobbs R., Roxburgh C., Byers A.H. *Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity*: McKinsey Global Institute Report. 2011. URL: http://www.mckinsey.com/insights/mgi/research/technology_and_innovation/big_data_the_next_frontier_for_innovation (дата обращения: 10.02.2013).
5. Канаракус К. Машина Больших Данных. *Сети* (Network World). 2011. № 04. URL: <http://www.osp.ru/nets/2011/04/13010802/> (дата обращения: 10.02.2013).
6. Lynch C. How do your data grow? *Nature*. 2008. V. 455. № 7209. P. 28–29.
7. Human Genome Project Information Website. URL: http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/home.shtml (дата обращения: 10.02.2013).
8. Drmanac R., Sparks A.B., Callow M.J., Halpern A.L., Burns N. L., Kermani B.G., Carnevali P., Nazarenko I., Nilsen G.B., George Yeung G., et al. Human genome sequencing using unchained base reads on self-assembling DNA nanoarrays. *Science*. 2010. V. 327. P. 78–81.

9. Pell J., Hintze A., Canino-Koning R., Howe A., Tiedje J.M., Brown C.T. Scaling metagenome sequence assembly with probabilistic de Bruijn graphs. *PNAS*. V. 109. P. 13272–13277.
10. Eric E.S., Linderman M.D., Sorenson J., Lee L., Nolan G.P. Computational solutions to large-scale data management and analysis. *Nat Rev Genet*. 2010. V. 11. P. 647–657.
11. Loh P., Baym M., Berger B. Compressive genomics. *Nature Biotechnology*. 2012. V. 30. P. 627–630.
12. *E-health Standards and Interoperability*: ITU-T Technology Watch Report. April 2012. URL: http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000170001PDFE.pdf (дата обращения: 10.02.2013).
13. Castro D. The Role of Information Technology in Medical Research. In: *IEEE 2009: Atlanta Conference on Science, Technology and Innovation Policy* (October 2009). 2009.
14. *Объединенный центр вычислительной биологии и биоинформатики на базе Института математических проблем биологии Пушчинского научного центра РАН*. URL: <http://www.jcbi.ru/index.html> (дата обращения: 10.02.2013).
15. Brumfiel G. High-energy physics: Down the petabyte highway. *Nature*. 2011. V. 469. № 7330. P. 282–283.
16. Essers L. Фильтр секретов мироздания. *Computerworld Россия*. 2011. № 18.
17. *The Sloan Digital Sky Survey*. URL: <http://www.sdss.org/> (дата обращения: 10.02.2013).
18. Data, data everywhere. A special report on managing information. *The Economist*. 2010.
19. Stephens M. Petabyte-chomping big sky telescope sucks down baby code. *The Register*. URL: http://www.theregister.co.uk/2010/11/26/lsst_big_data_and_agile (дата обращения: 10.02.2013).
20. Boon M. Astronomical Computing. *Symmetry Breaking*. URL: <http://www.symmetrymagazine.org/breaking/2010/10/18/astronomical-computing> (дата обращения: 10.02.2013).
21. *LOFAR website*. URL: <http://www.lofar.org/> (дата обращения: 10.02.2013).
22. *SKA Project website*. URL: <http://www.skatelescope.org/> (дата обращения: 10.02.2013).
23. Пугачев В.Д., Исаев Е.А., Амзараков М.Б., Самодуров В.А., Сухов Р.Р., Кобылка Н.А. Развитие центров обработки научных данных. В: *Всероссийская радиоастрономическая конференция*: тез. докл. С.-П.: ИПА, 2011. С. 144.
24. *Проект «РадиоАстрон»*. URL: <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/rus/index.html> (дата обращения: 10.02.2013).
25. Indiana launches new ultra-high-speed network. *University Information Technology Services*. URL: <http://uitsnews.iu.edu/2012/01/31/indiana-launches-new-ultra-high-speed-network> (дата обращения: 10.02.2013).
26. Дубова Н. В авангарде Больших Данных. *Открытые системы*. 2012. № 03.
27. *The Apache Software Foundation Project*. URL: <http://www.apache.org/foundation> (дата обращения: 10.02.2013).
28. *Apache Hadoop project website*. URL: <http://hadoop.apache.org> (дата обращения: 10.02.2013).
29. White T. *Hadoop: The Definitive Guide. Storage and Analysis at Internet Scale*. 3rd Edition. O'Reilly Media; Yahoo Press., 2012. 688 p.
30. Dean J., Ghemawat S. MapReduce: Simplified data processing on large clusters. In: *Proceedings of the Sixth Conference on Operating System Design and Implementation*. Berkeley, 2004.
31. Sadalage P., Fowler M. *NoSQL Distilled*. Pearson Education, 2012. 192 p.

32. Stonebraker M., Abadi D., Dawitt D.J., Madden S., Paulson E., Pavlo A., Rasin A. MapReduce and Parallel DBMSs: Friends or Foes? *Communications of the ACM*. 2010. V. 53. № 1.
33. Pavlo A., Paulson E., Rasin A., Abadi D.J., DeWitt D.J., Madden S.R., Stonebraker, M. A comparison of approaches to large-scale data analysis. In: *Proceedings of the 35th SIGMOD International Conference on Management of Data*. New York: ACM Press, 2009. P. 165–178.
34. Черняк Л. Платформы для Больших Данных. *Открытые системы*. 2012. № 07.
35. Артемов С. Big Data: новые возможности для растущего бизнеса. «Инфосистемы Джет». URL: <http://www.jet.su> (дата обращения: 10.02.2013).
36. Announcing the New SGI UV: The Big Brain Computer. *Business Wire*. URL: <http://www.businesswire.com/news/home/20120618005340/en> (дата обращения: 10.02.2013).
37. Выходцев А. Платформа для Больших Данных. *Открытые системы*. 2012. № 06.
38. Яхина И. Хранилище для Больших Данных. *Открытые системы*. 2012. № 07.
39. Серов Д. Машины для аналитиков. *Открытые системы*. 2011. № 04.
40. Черняк Л. Большие данные возрождают DAS. *Computerworld Россия*. 2011. № 14.
41. Проект EGEE-RDIG. URL: <http://www.egee-rdig.ru> (дата обращения: 10.02.2013).
42. TOP500 List of the world's top supercomputers. November 2012. URL: <http://www.top500.org/lists/2012/11/> (дата обращения: 10.02.2013).
43. URL: <http://www.olcf.ornl.gov/titan/> (дата обращения: 10.02.2013).
44. URL: <http://parallel.ru/cluster/lomonosov.html> (дата обращения: 10.02.2013).
45. *The OpenNet Project*. URL: <http://www.opennet.ru/opennews/art.shtml?num=35358> (дата обращения: 10.02.2013).
46. *The Graph 500 List*. URL: <http://www.graph500.org/> (дата обращения: 10.02.2013).
47. *Вычислительный кластер ПИЦ РАН*. URL: <http://www.jcbi.ru/klaster/index.shtml> (дата обращения: 10.02.2013).
48. Лахно В.Д., Исаев Е.А., Пугачев В.Д., Зайцев А.Ю., Фиалко Н.С., Рыкунов С.Д., Устинин М.Н. Развитие информационно-коммуникационных технологий в Пушинском научном центре РАН. *Математическая биология и биоинформатика*. 2012. Т. 7. № 2. С. 529–544.
49. Шацкая М.В., Гирин И.А., Исаев Е.А., Лихачев С.Ф., Пимаков А.С., Селиверстов С.И., Федоров Н.А. Организация центра обработки научной информации для радиоинтерферометрических проектов. *Космические исследования*. 2012. Т. 50. № 4. С. 346–350.

Материал поступил в редакцию 22.02.2013, опубликован 25.02.2013.