

# INFORMATION SYSTEM FOR SATELLITE DATA ACQUISITION, ARCHIVING AND ANALYSIS AS AN INSTRUMENT FOR MONITORING OF OBJECTS OF ARTIFICIAL AND NATURAL ORIGIN

Yurii I. Shokin<sup>(1)</sup>, Igor A. Pestunov<sup>(1)</sup>, Dmitri L. Chubarov<sup>(1)</sup>, Vladimir A. Kikhtenko<sup>(1)</sup>, Elena A. Mamash<sup>(1)</sup>, Nikolay N. Dobretsov<sup>(1,2)</sup>, Polina V. Voronina<sup>(1)</sup>, Yury.N. Sinyavsky<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk

<sup>(2)</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk

**Abstract:** We review the architecture and general operating principles of the system for satellite data acquisition, archiving, and analysis as it is implemented at the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Based upon our experience of using the system we discuss its applications in different scientific and technical domains.

*Keywords:* information system, satellite monitoring, spatial data processing.

# ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА СБОРА, ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ИВТ СО РАН КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Ю.И. Шокин<sup>(1)</sup>, И.А. Пестунов<sup>(1)</sup>, Д.Л. Чубаров<sup>(1)</sup>, В.А. Кихтенко<sup>(1)</sup>, Е.А. Мамаш<sup>(1)</sup>,  
Н.Н. Добрецов<sup>(1,2)</sup>, П.В. Воронина<sup>(1)</sup>, Ю.Н. Синявский<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

<sup>(2)</sup> Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск

В докладе рассматривается структура и основные принципы работы развернутой в ИВТ СО РАН системы сбора, хранения и обработки спутниковых данных и обсуждается спектр возможностей системы для решения различных тематических задач.

*Ключевые слова:* информационная система, спутниковый мониторинг, обработка пространственных данных.

**Общая структура системы.** В последние несколько лет все большую популярность приобретают задачи, связанные с анализом накопленного за последние десятилетия архива спутниковых данных, позволяющего исследовать динамику и закономерности большого количества природных и антропогенных процессов. В связи с этим, становится актуальным переход от традиционной схемы работы со спутниковой информацией, основанной на обработке отдельных сцен, к концептуально новой модели работы с архивом спутниковых данных как с единым целым. Результатом такого подхода является эффективная реализация процедур статистического анализа, решение большого класса новых тематических задач, включая исследование динамики процессов в отдельном пикселе или на заданном полигоне, а также возможность совместного использования данных из разных источников.

Начиная с 2007 года, в ИВТ СО РАН функционирует информационно-вычислительная инфраструктура приема, глубокой обработки и проведения статистического анализа больших объемов спутниковых данных и другой пространственной информации [1-7]. В базе данных ИВТ СО РАН в настоящее время представлены данные как с зарубежных, так и с отечественных космических аппаратов: SPOT, (Terra+Aqua)/MODIS, Landsat, Метеор, Ресурс-П, Канопус-В.

Инфраструктура основана на ранее разработанных в ИВТ СО РАН технологиях и состоит из двух основных блоков: комплекса обработки спутниковых снимков и блока информационной аналитики (Рис. 1).

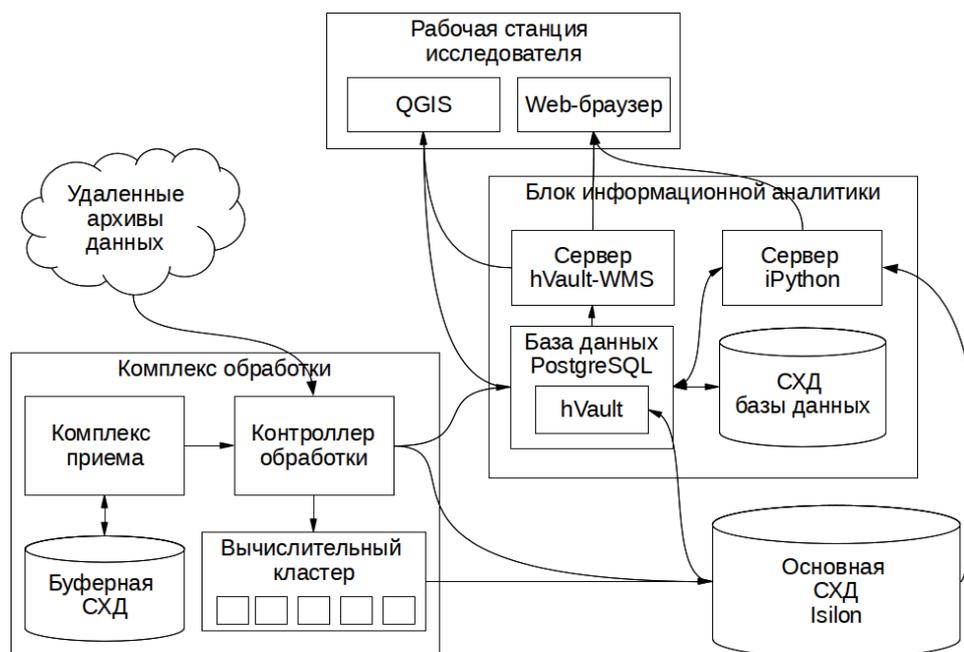


Рис. 1. Схема взаимодействия компонент информационно-вычислительной инфраструктуры

Комплекс приема и обработки обеспечивает своевременное получение спутниковых данных и их глубокую обработку. Исходные данные принимаются как непосредственно с космических аппаратов в режиме прямой передачи данных, так и загружаются из удалённых архивов, что, с одной стороны обеспечивает оперативность предоставления обработанных данных исследователю, а с другой расширяет спектр доступной информации для ретроспективного анализа.

Система управления потоковыми процессами автоматически обеспечивает параллельное выполнение обработки данных в распределенном режиме на узлах кластера. Тем самым обеспечивается получение стандартных продуктов глубокой обработки в режиме близком к реальному времени.

Весь архив информационных продуктов, произведенных на основе данных дистанционного зондирования, находится в постоянной доступности. Хранение данных и их каталогизация внутри одного дерева директорий обеспечивается горизонтально масштабируемым сетевым хранилищем Isilon на основе технологии OneFS [8]. Реализованная конфигурация хранилища предназначена для решения задачи долговременного хранения нескольких сотен терабайт данных с обеспечением их постоянной доступности.

Блок информационной аналитики предоставляет исследователям средства виртуальной интеграции разнородных данных, а также инструментарий для проведения ретроспективного анализа, статистической обработки и визуализации. Его ключевым элементом является СУБД PostgreSQL с разработанным в ИВТ СО РАН дополнительным модулем hVault для прямого доступа к файловому архиву геопространственной информации без необходимости предварительного копирования и преобразования форматов данных [9].

Существует два концептуально разных подхода в работе с пространственными данными. Первый, традиционный для спутниковых данных, состоит в поддержании сети распределенных архивов, единицей хранения которых являются файлы сцен. В другом подходе, традиционном для реляционных баз данных, элементом хранения является отдельная запись. Недостатком подхода, основанного на выгрузке отдельных сцен, является

избыточное копирование, что снижает его эффективность при работе с большими архивами, поэтому актуальной становится задача обеспечения эффективной работы с архивом как с базой данных.

Задачи информационной аналитики, требующие обращения к значительному объему записей, хранящихся в реляционной базе данных могут быть решены либо внешними средствами с выгрузкой данных в специальную структуру, оптимизированную для работы с отношениями, определенными на временных и пространственных шкалах (OLAP), либо за счет интеграции функций для работы с временными и пространственными данными в механизм выполнения реляционных запросов (in-database processing).

Технологии, основанные на многомерном представлении данных – OLAP-технологии – обеспечивают высокую скорость выполнения запросов, что позволяет работать в интерактивном режиме, но такие решения требуют выгрузки данных в новую структуру, выполнения предварительного агрегирования данных, что неосуществимо при работе с архивами, объем которых может составлять сотни терабайт. С другой стороны, технологии, основанные на выполнении вычислений в процессе исполнения запроса, особенно эффективны при параллельной обработке.

В ИВТ СО РАН предложен и реализован подход к работе с архивом пространственных данных, объем которого превышает 100 TB, основанный на отображении данных в единую реляционную модель [9,10]. Модуль hVault реализует прозрачное отображение файлового архива спутниковых снимков в виртуальные таблицы базы данных. Он позволяет выполнять произвольные SQL-запросы к данным файлового архива, при этом планировщик запросов оптимизирует их выполнение на основе доступных метаданных, а применяемые для выполнения вычислений алгоритмы предусматривают работу с объемами информации превосходящими ёмкость оперативной памяти сервера СУБД (Рис. 2).

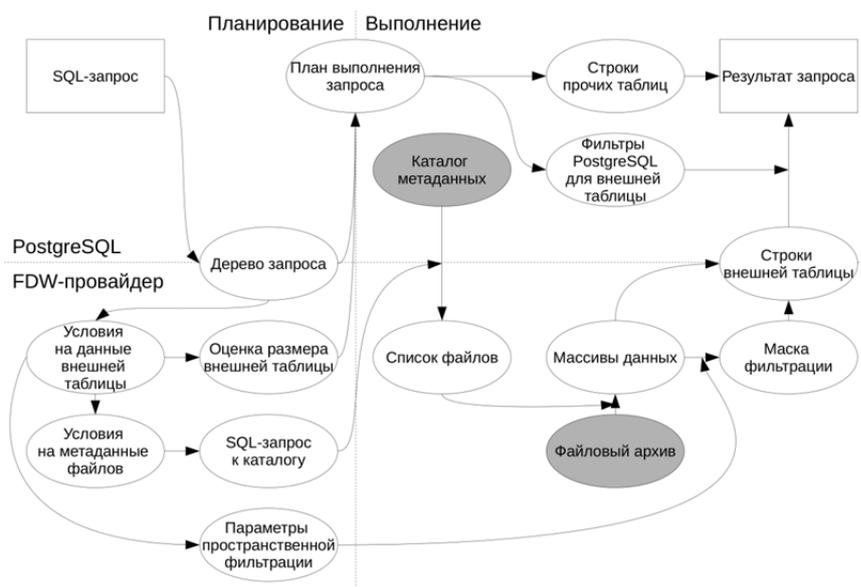


Рис. 2. Схема выполнения запроса в системе hVault

На основе hVault построен сервер протокола WMS (Web Map Service), предоставляющий доступ ко всему архиву. Особенностью этого сервера является поддержка произвольных SQL запросов к системе, что позволяет реализовать произвольные вычисления на стороне сервера перед отображением карты.

Таким образом, исследователю предоставляется широкий ассортимент инструментов для работы с данными. Все современные ГИС-системы поддерживают работу с пространственными СУБД, в их числе такие свободно распространяемые пакеты программ, как QGIS и GRASS GIS. Также возможно использование такого популярного среди научных работников интерактивного инструмента для совместной работы с данными, как iPython Notebook Server, основанного на языке программирования Python.

Предложенная технология предоставляет следующие преимущества по сравнению с традиционной технологией работы с данными дистанционного зондирования:

- работа с данными эквивалентна работе с таблицами значений. Она не требует использования специализированного программного обеспечения, в том числе загрузки и анализа отдельных снимков — одним запросом обрабатывается группа снимков, выбранных по заданным признакам;
- пользователю предоставляется возможность исследования многолетней динамики процессов как в отдельно взятой точке, так и на выделенном полигоне;
- математическая и статистическая обработка данных производится ядром СУБД в момент выполнения SQL запросов;
- возможность быстрой оценки основных статистических характеристик исследуемой выборки спутниковых данных и её качества.

Для повышения производительности системы была предложена структура данных для эффективной агрегации данных в приложениях в области интерактивной визуализации — интервальное дерево отрезков. Средствами Apache Spark развернута масштабируемая вычислительная инфраструктура, основанная на модели распределенных массивов. Выполнена реализация интервального дерева отрезков в этой модели. Модель распределенных массивов и, в частности, средства Apache Spark в настоящее время широко применяются для построения распределенных систем обработки данных ведущими технологическими компаниями. В частности, средства для работы с данными дистанционного зондирования в этой модели разрабатываются в качестве перспективного инструмента для доступа к данным, хранящимся в архивах NASA [11].

Разработанную систему извлечения данных из архива спутниковых снимков можно сопоставить с такими системами как NASA Giovanni [12], Google Earth Engine [13] и европейским проектом TELEIOS [14]. Все они нацелены на предоставление доступа к большим объемам спутниковых снимков.

Для поддержки исследований, выполняемых с помощью данных из распределенных архивов центра Годдарда (NASA), была разработана упомянутая выше система Giovanni. Лептух и Эккер реализовали первую версию Giovanni на основе системы GrADS [15], предназначенной для совместной обработки разнородных данных, определенных на сетках, заданных в трех пространственных, временном, а также одном дополнительном измерениях. Функциональные возможности системы hVault соответствуют уровню доступа к данным, однако, превосходят возможности GrADS в нескольких аспектах: промежуточные результаты, полученные при выполнении запроса, также могут быть сохранены в hVault и доступны для последующих запросов, кроме того, возможности пространственной СУБД позволяют оптимизировать выполнение запросов, требующих извлечения небольшого объема данных из большого числа исходных файлов.

Еще одна информационная система для совместной работы с данными в науках о Земле разрабатывается в рамках проекта компании Google (Google Earth Engine, GEE). Подход,

реализованный в этом проекте, отличается от подходов, предлагаемых в рамках ESC и в настоящей работе, тем, что интеграция данных из архивов в информационную систему осуществляется посредством импорта и преобразования самих данных к единому формату. На уровне алгоритмов тематической обработки данных вся загруженная в систему информация приведена к единому типу, соответствующему растровому покрытию некоторой области пространства. Такие покрытия, допускающие единообразную обработку, организуются в коллекции. Так, каждому информационному продукту MODIS соответствует отдельная коллекция, содержащая все файлы, импортированные в систему. Отличие обусловлено тем, что перед разработчиками GEE не стоят ограничения на объем данных, а также отсутствует необходимость хранения данных в оригинальных форматах. Система GEE также поддерживает выполнение вычислений в удаленном режиме и сохранение промежуточных результатов в виде отдельных изображений или массивов векторных данных, а также их выгрузку из системы на компьютер пользователя. Как и в системе Giovanni, в GEE работа с данными без предварительного их пересчета на регулярную сетку не поддерживается. В отличие от GEE, система hVault предназначена для работы с архивами данных в исходных форматах.

Проект TELEIOS [14] нацелен на создание инфраструктуры виртуальной обсерватории для данных зондирования Земли. В части организации доступа к данным он опирается на технологию колоночной базы данных MonetDB Data Vault [16]. Эта технология позволяет обращаться к файловым архивам спутниковых снимков средствами базы данных, посредством автоматической загрузки и преобразования данных в таблицы базы данных. Ограничением этой технологии является объем доступной оперативной памяти сервера.

В отличие от описанных систем, в системе hVault нет ограничений на вид запросов к данным, так как поддерживаются произвольные SQL-запросы, в том числе, с использованием хранимых процедур, что позволяет реализовать выполнение произвольного алгоритма. Кроме того, она рассчитана на работу с пространственными данными, представленными в виде набора файлов, любого объема без необходимости их предварительного преобразования и подготовки, что упрощает ее развертывание для существующих архивов данных дистанционного зондирования и других архивов пространственных данных.

Ниже приведены примеры использования предложенной технологии при решении некоторых тематических задач.

**Анализ пространственно-временного распределения точек термальных аномалий.** Разработанные программные инструменты позволили решить ряд прикладных задач, одной из которых является исследование пространственно-временного распределения термальных аномалий (термоточек) на территории Евразии.

На основе Apache Spark создан прототип системы агрегации разнородных пространственных данных, ориентированный на масштабируемые вычислительные архитектуры. Прототип реализован в рамках сервисной инфраструктуры рабочих пространств для интерактивного удаленного счета (ipython.ict.nsc.ru). Для демонстрации возможностей прототипа на его основе реализовано приложение, обеспечивающее интерактивное отображение картосхемы плотности термоточек (hotspot) по данным MODIS (MOD14) за произвольный период времени (Рис. 3).

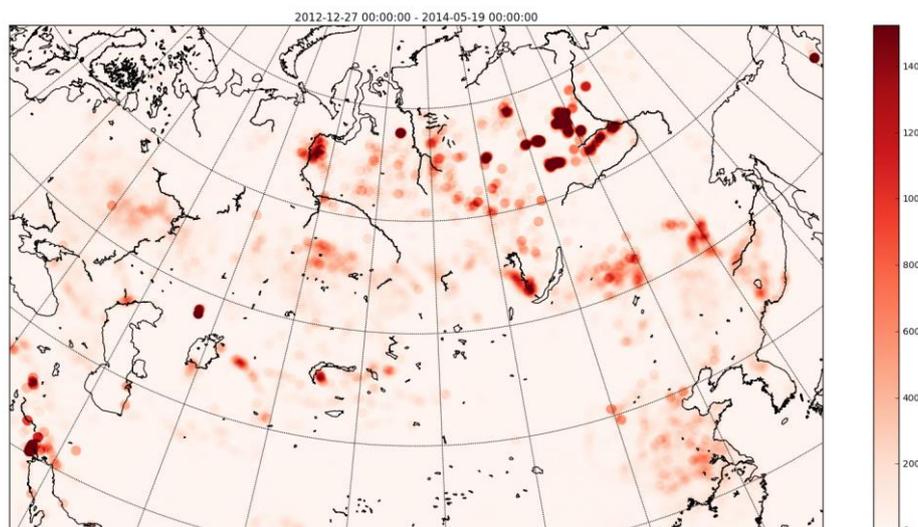


Рис. 3 Демонстрация работы приложения для интерактивной агрегации большого объема данных: плотность термоточек, зарегистрированных на территории Северной Евразии, интервал агрегирования 27.12.2012 – 19.05.2014

Пространственное распределение термоточек существенно различается год от года, что отражает различия пожарных сезонов. Ещё одним способом сравнения пожарных сезонов, является сравнение роста числа термоточек в течение сезона, подсчитанных с нарастающим итогом (Рис. 4).

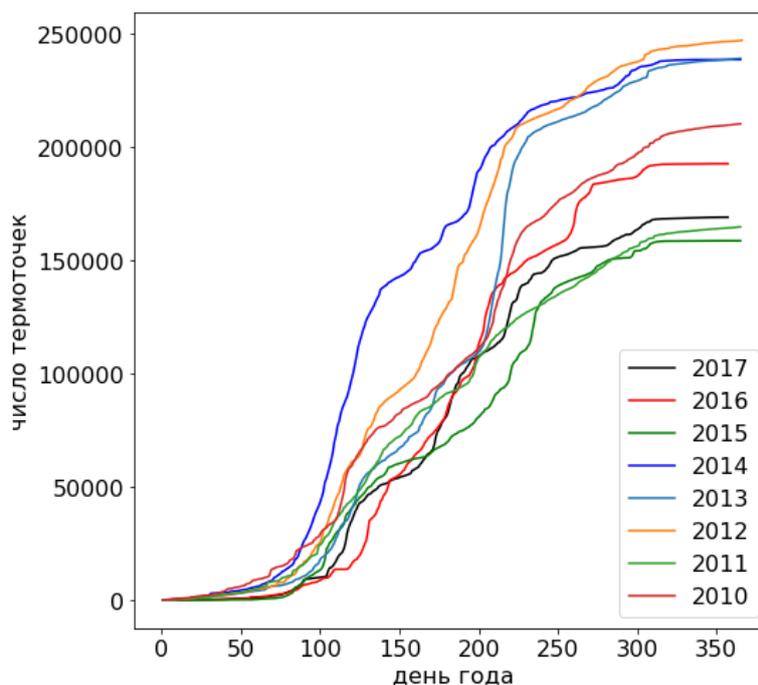


Рис. 4 Число термоточек, зарегистрированных на территории Сибири и Дальнего Востока в 2010-2017 гг.

На графиках, подобных приведенному на рисунке 4, построенных для различных территорий, можно выделить группы сезонов в зависимости от интенсивности появления термоточек. Ещё одна функция таких графиков возможность прогнозирования по году аналогу.

Одним из ограничений статистических наблюдений за динамикой природных пожаров, построенных на подсчете термоточек, является наличие среди них тех, что не связаны с природными пожарами. Значительную долю составляют те термоточки, которые связаны с промышленными источниками тепла. Один из способов выявления термоточек, связанных с промышленными объектами, основан на том факте, что они, в отличие от природных пожаров, являются постоянными и неподвижными источниками теплового излучения. Таким образом, вокруг таких источников могут накапливаться кластеры. С помощью методов автоматической кластеризации на территории Сибири и Дальнего Востока было выявлено несколько сотен кластеров термоточек. С помощью данных более высокого разрешения была выполнена валидация полученных кластеров, которая подтвердила, что они связаны с различными промышленными источниками тепла. В основном, – с установками сжигания попутного газа на нефтяных месторождениях.

Дальнейшее исследование было направлено на каталогизацию найденных источников. Цель продолжения исследований состоит в изучении возможности использования постоянных источников тепла для точной географической привязки тепловых спутниковых снимков. О возможностях этого метода можно судить по тому, что положение источника на снимке может быть определено с точностью значительно превышающей разрешение кадра (Рис. 5). Центр теплового пятна, зарегистрированного на снимке в канале B11 (КА Landsat, сенсор TIRS, 11 мкм), с точностью до нескольких метров совпадает с положением установки сжигания попутного газа. Представляет интерес возможность повышения точности привязки не только данных высокого и среднего, но и низкого разрешения, таких как данные MODIS. Для этого потребуется точное вычисление положения источника по небольшому числу пикселей исходного изображения. Одним из способов решения этой проблемы является интерполяция значений на сетку более крупного масштаба.

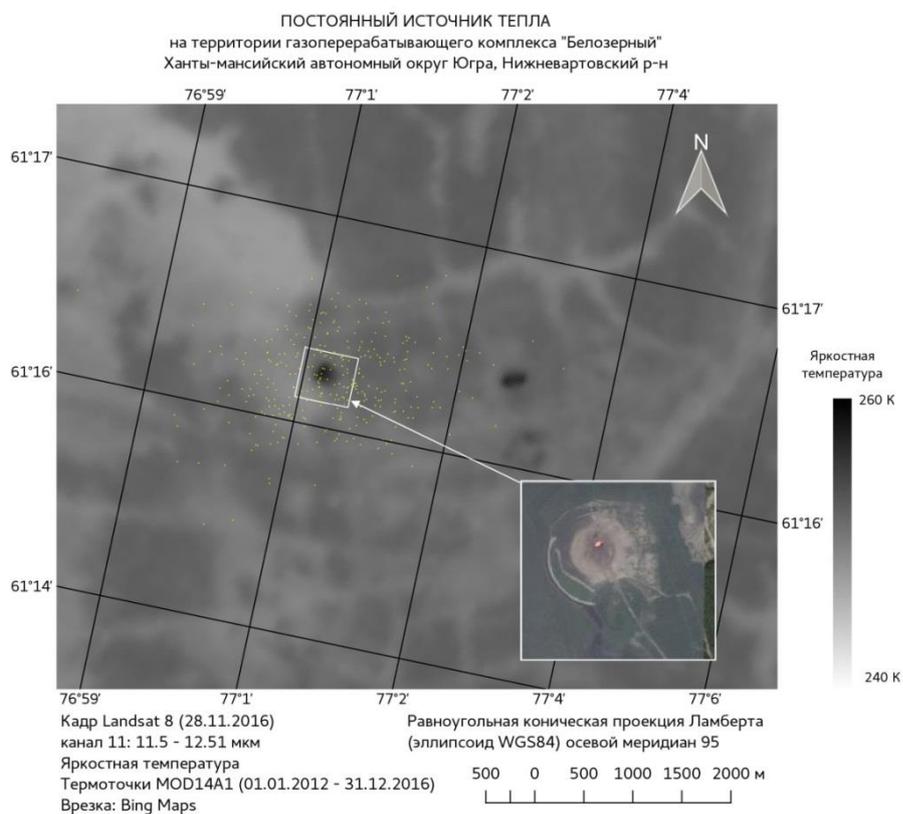


Рис. 5 Образ найденной с помощью кластеризации установки сжигания попутного газа на снимке, выполненном с разрешением 100 м.

### Оценка качества спутниковых данных на примере вычисления индекса NDVI.

Одной из важных и часто решаемых задач с помощью ДДЗ является вычисление всевозможных индексов, и отдельный интерес заключается в оценке соответствия значений индексов, полученных на основе спутниковых данных реальному состоянию исследуемых природных объектов. Это, прежде всего, зависит от качества используемой информации. Созданная система спутниковых данных позволяет решать такого рода задачи. Например, была выполнена оценка применимости спутниковых данных для исследования состояния посевных сельхозкультур. Ход развития посевных культур отражается на интенсивности фотосинтетической активности, одним из показателей которой является индекс NDVI. Данные MODIS позволяют при благоприятных условиях съемки восстанавливать значения индекса для отдельных полей. Для того, чтобы определить количество дней, когда восстановленный индекс может быть пригоден для оценки состояния растений, были извлечены данные за период с 1-го марта по 1-е сентября 2017 для одного из полей сельскохозяйственного предприятия, расположенного на территории Новосибирской области. Полученные результаты представлены на рисунке 6.

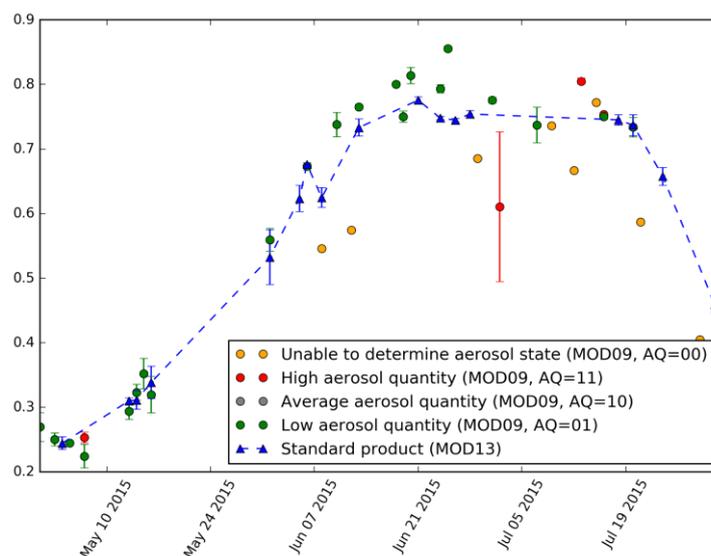


Рис. 6 Динамика NDVI для поля пшеницы по данным из различных источников.

**Поиск статистических отклонений температуры земной поверхности методом RST (Robust Satellite Technique) для территории юга Сибири.** Созданная система также является эффективным инструментом статистического анализа накопленной за годы спутниковой информации. Эта эффективность позволила реализовать метод RST (Robust Satellite Techniques), в основе которого лежит статистический анализ наборов спутниковых данных температуры земной поверхности для выделенной территории [17]. По выбранной области вычисляется индекс, основным достоинством которого является то, что при выборе области и временного интервала подходящих размеров он позволяет исключить влияние вариаций температуры, вызванных климатическими процессами, неоднородностью рельефа и погодными условиями [7,18]. На рисунке 7 представлены результаты применения метода RST для территории юга Сибири.

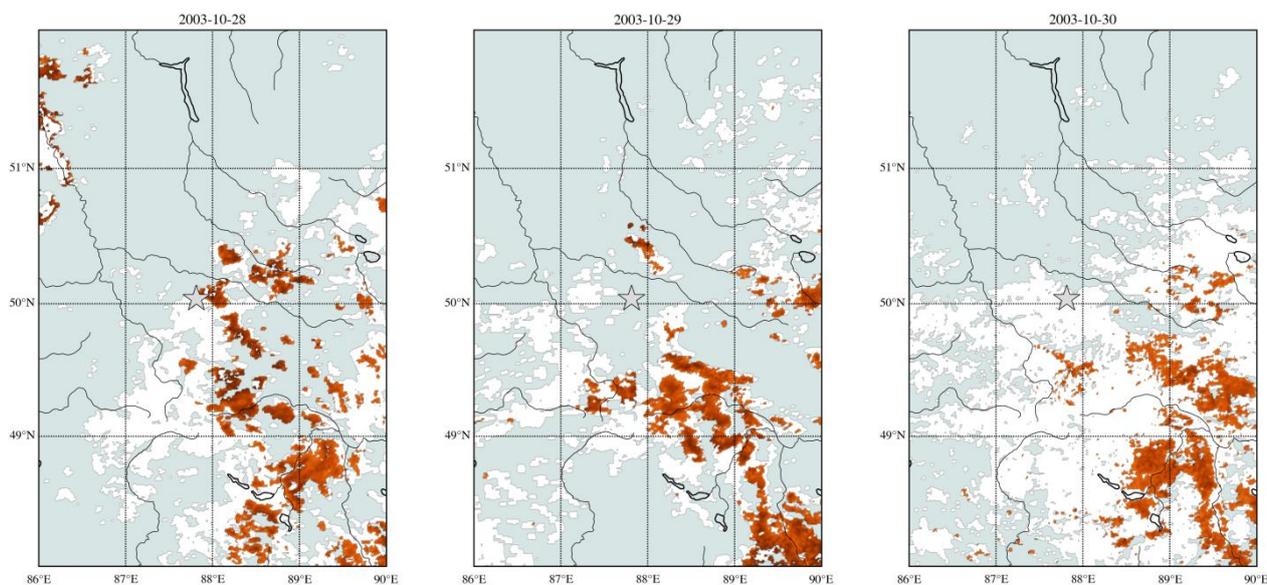


Рис. 7. Области с аномальными значениями температуры в дни после Чуйского землетрясения (27.09.2003). Коричневым цветом выделены области с наибольшими значениями температуры.

Также была предложена модификация метода RST, которая заключается в суммировании только аномальных значений индекса в пикселе. Предложенная модификация метода RST позволяет частично отфильтровывать их случайные проявления. С использованием модифицированной методики проведен анализ полей температуры поверхности для сейсмически активной территории Горного Алтая для интервала 2001–2005 гг. Результаты для 2003 и 2004 годов приведены на рисунке 8. Выявлены участки с устойчивыми по пространству и времени тепловыми аномалиями, а также участки с отсутствием аномалий. Модифицированная методика теоретически позволяет разделять аномальные проявления на две категории. Первая – это «продолжительные аномалии», при которых аномальные точки непрерывно проявляются несколько раз подряд, формируя тем самым некое событие, продолжающееся во времени. Оно аномально по отношению к фону, но достаточно длительное по отношению к частоте измерений. И вторая – это «пульсирующие аномалии», в которых аномальные точки проявляются несколько раз в течение исследуемого интервала времени, но по отношению друг к другу возникают в разное время.

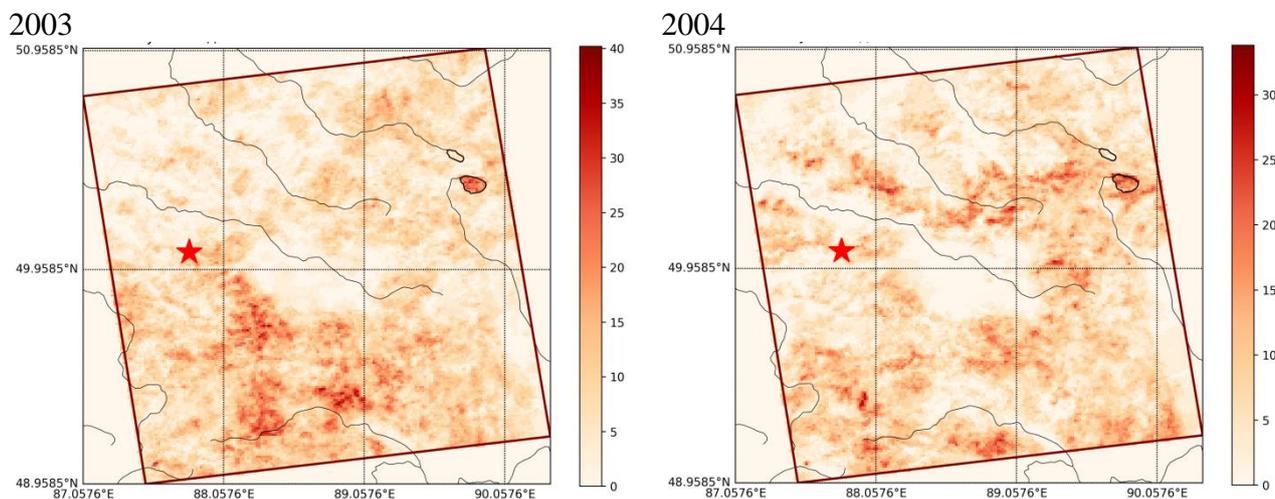


Рис. 8. Накопительная сумма аномальных значений индекса

**Применение алгоритмов многомерной интерполяции для решения задачи восстановления пропусков в спутниковых данных.** Наличие пропусков в ДДЗ затрудняет использование данных для моделирования процессов, протекающих на поверхности Земли, традиционными средствами ГИС. Для решения задачи восстановления пропущенных данных средствами разработанной системы работы со спутниковыми данными были реализованы некоторые известные методы построения полных временных рядов по частично определенным данным. Была решена задача повышения точности метода RST за счет предварительного восстановления временных рядов, полученных по данным дистанционного зондирования. Использовались такие методы аппроксимации временных рядов как HANTS [19] и полиномиальные аппроксимации (Рис. 9).

Выполнено сравнение аппроксимации, полученной методом HANTS, с аппроксимацией полиномами различной степени.

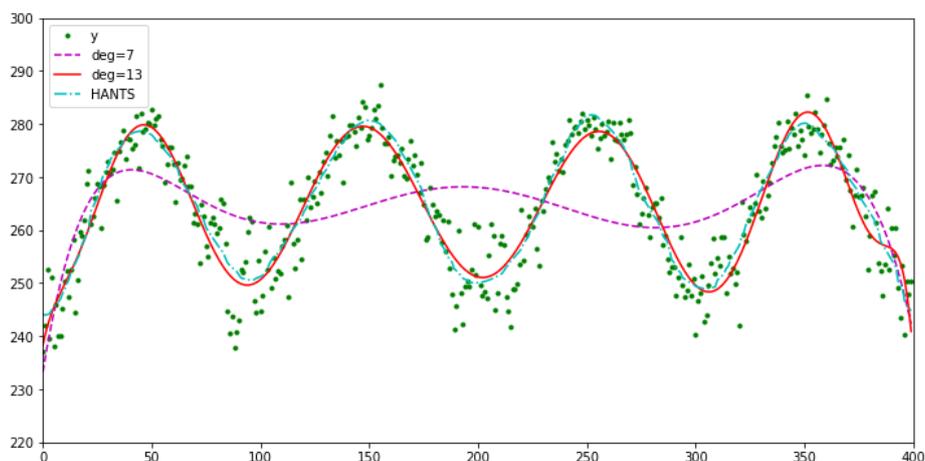


Рис. 9 Сравнение аппроксимации методом HANTS и полиномами различных степеней

Получены результаты восстановления рядов температуры поверхности Земли, полученных по данным дистанционного зондирования, для территории Горного Алтая, представляющей интерес с точки зрения мониторинга активных геологических разломов (Рис. 10).

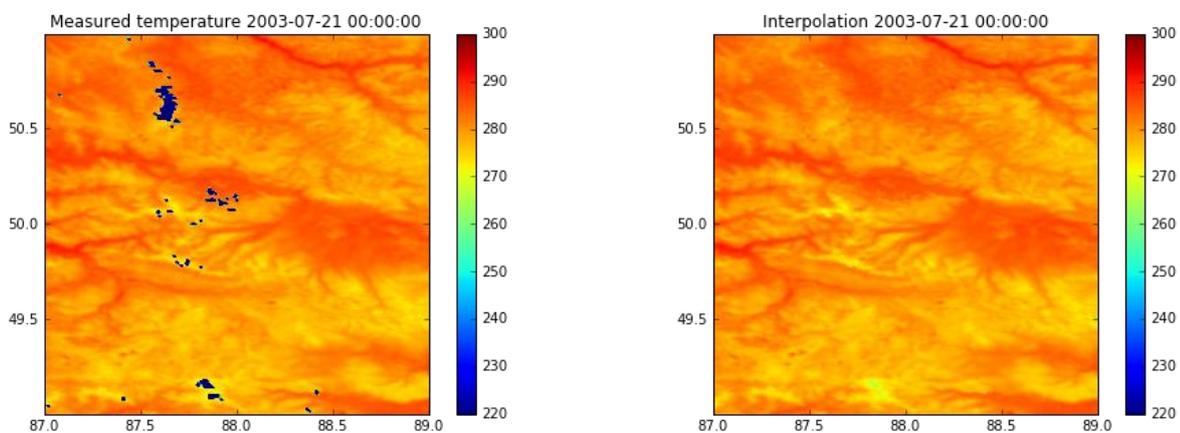


Рис. 10 Результаты восстановления значений температуры по методу HANTS

**Мониторинг температурных полей почв для картографического моделирования почвенного покрова.** Температурный режим является одним из наиболее значимых

экологических факторов, который совместно с гидрологическим режимом характеризует общий энергетический уровень формирования и функционирования почвенного покрова. Температурное поле почв представляет совокупность значений температуры в точках пространственной области, которое согласно результатам исследований, полученных как в нашей стране, так и за рубежом, рассматривается в качестве ведущего фактора структурно-функциональной организации почвенного покрова.

С помощью системы hVault по данным сенсора MODIS (продукт MOD11), установленным на спутниках Terra/Aqua, было получено распределение средних дневных и ночных температур за 16-ти летний период (2001-2016 гг.) Среднесибирского трансекта и плоскогорья Укок (Рис. 11).

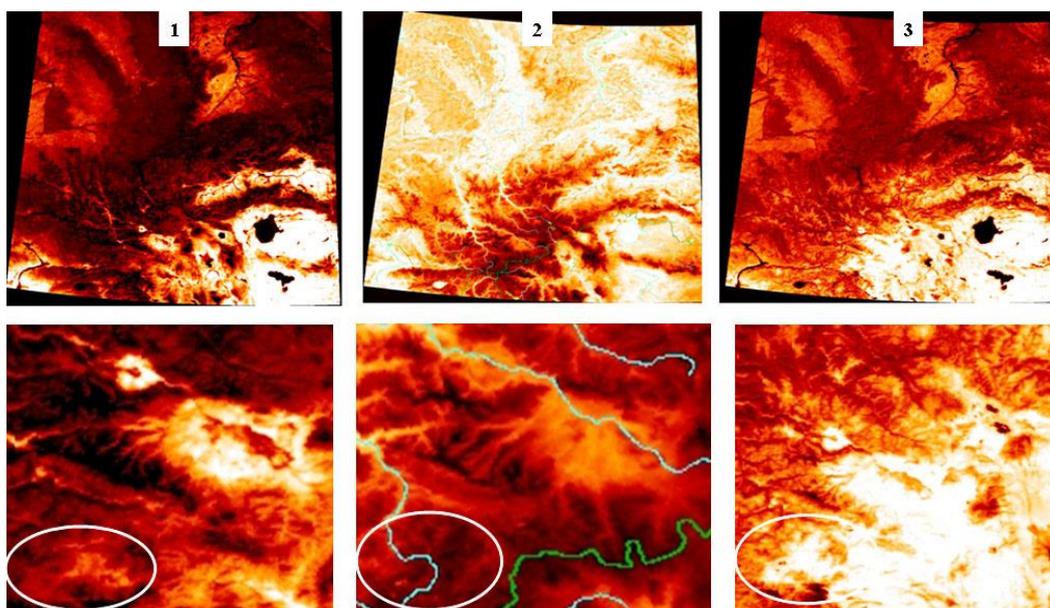


Рис. 11. Распределение температурных полей среднесибирского трансекта и плоскогорья Укок (внизу), рассчитанные за 16-ти летний период (2001-2016 гг.) по данным сенсора MODIS. 1- дневные, 2 – ночные температуры, 3 – разность дневных и ночных температур

На рисунке 2 в качестве примера представлены результаты интерпретации выделения типологических единиц структурной и функциональной организации почвенного покрова плоскогорья Укок на основе статистического анализа совмещения границ контуров почвенного покрова и температурных полей, полученных по спутниковым данным.

Показано [20], что картографические модели температурных полей, полученные в результате совместного анализа наземных и спутниковых данных, обладают достаточной информативностью в отношении энергетики почвообразовательных процессов и могут быть использованы для оценки термических условий почв малоисследованных и труднодоступных территорий Алтае-Саянского региона.

Наиболее интересные результаты и возможности разработанной системы представлены на сайте <http://sdc.esemc.nsc.ru/>, где также приводится информация о структуре системы, о данных и продуктах комплекса, возможности визуализации и доступа к ним, приводятся примеры космоснимков различных наблюдаемых природных и техногенных явлений, результаты обработки пространственных данных, извлеченных из архива.

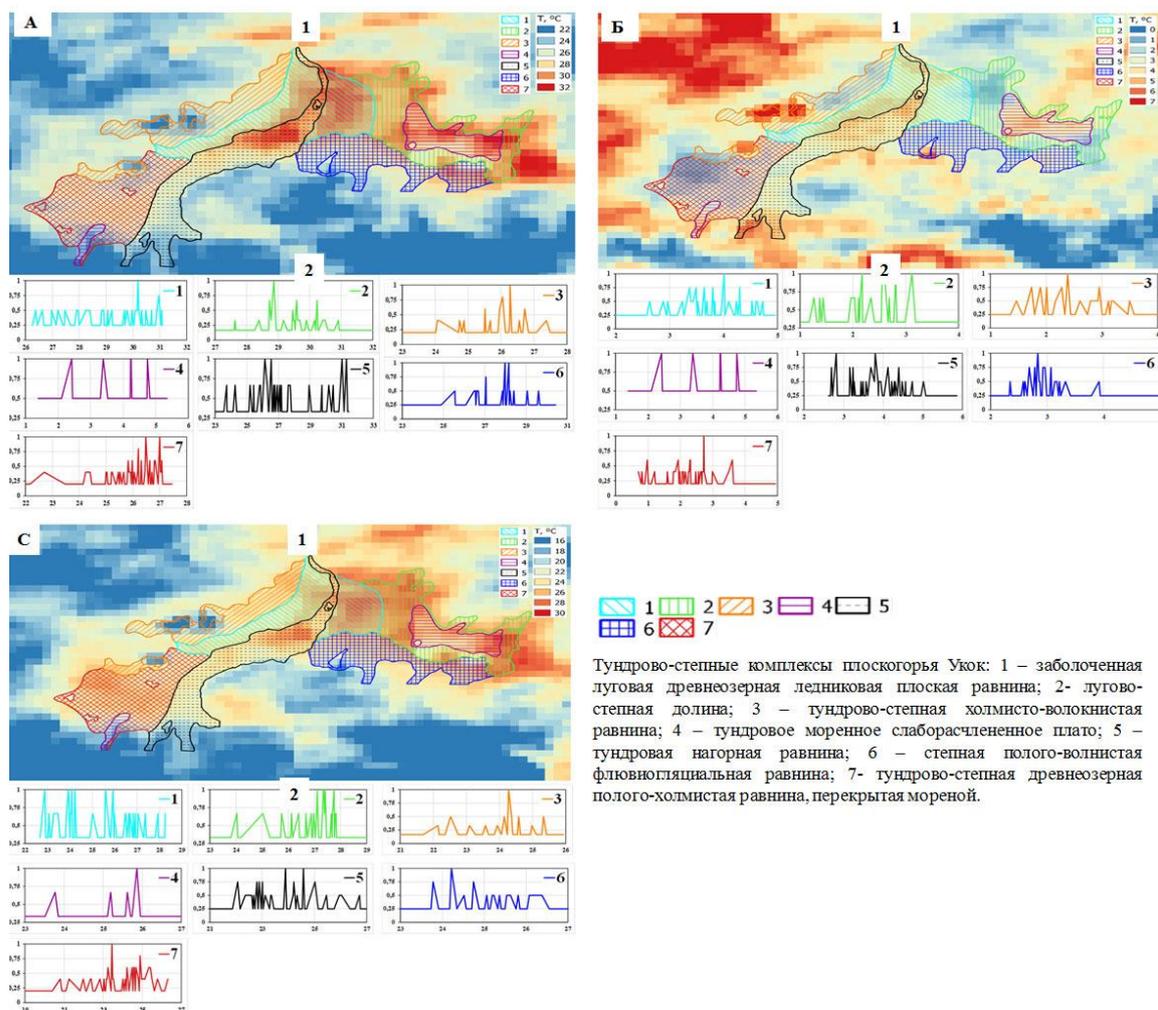


Рис. 2. Картографические модели температурных полей тундрово-степных комплексов плоскогорья Укок, созданные на основе анализа спутниковых данных: А – дневных, Б – ночных и С – разницы температур. 1 - контуры температурных полей; 2 - статистический анализ совмещения границ почвенных контуров и температурных полей

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шокин Ю.И., Жижимов О.Л., Пестунов И.А., Синявский Ю.Н., Смирнов В.В. Распределенная информационно-аналитическая система для поиска, обработки и анализа пространственных данных//Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 108-115.
- [2] Пестунов И.А., Смирнов В.В., Жижимов О.Л., Синявский Ю.Н., Скачкова А.П., Дубров И.С. Каталог пространственных данных для решения задач регионального мониторинга//Вестник Казахского национального университета. Серия: Математика, механика, информатика. 2008. Т. 13, № 43. С. 71-76.
- [3] Шокин Ю.И., Пестунов И.А., Смирнов В.В., Синявский Ю.Н., Скачкова А.П., Дубров И.С., Левин В.А., Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Бабяк П.В., Громов А.В., Недолужко И.В. Распределенная информационная система сбора, хранения и обработки спутниковых данных для мониторинга территорий сибиря и дальнего востока // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2008. Т. 1, № 4. С. 291-314.
- [4] Шокин Ю.И., Добрецов Н.Н., Смирнов В.В., Лагутин А.А., Антонов В.Н., Калашиников А.В. Система информационной поддержки задач оперативного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования.// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 109-112.
- [5] Шокин Ю.И., Антонов В.Н., Добрецов Н.Н., Кихтенко В.А., Лагутин А.А., Смирнов В.В., Чубаров Д.Л., Чубаров Л.Б. Распределенная система приема и обработки спутниковых данных Сибири и

Дальнего Востока. Текущее состояние и перспективы развития // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 5. С. 45-54.

- [6] Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б., Добрецов Н.Н., Кихтенко В.А., Смирнов В.В., Чубаров Д.Л. О распределенной инфраструктуре системы оперативного спутникового мониторинга ЦКП ДДЗ СО РАН // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18, Специальный выпуск, С. 86-94
- [7] Шокин Ю.И., Добрецов Н.Н., Мамаш Е.А., Кихтенко В.А., Воронина П.В., Смирнов В.В., Чубаров Д.Л. Информационная система приема, обработки и доступа к спутниковым данным и ее применение для решения задач мониторинга окружающей среды // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20, № 5. С. 157-174.
- [8] Patel N.N., Angiuli E., Gamba P., Gaughan A., Lisini G., Stevens F.R., Tatem A.J., Trianni G. Multitemporal settlement and population mapping from Landsat using Google Earth Engine // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. V.35. P. 199-208.
- [9] Кихтенко В.А., Чубаров Д.Л., Смирнов В.В. hVault: технология доступа к архиву спутниковых данных // XII Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Сборник тезисов докладов конференции (Москва, Россия, 10-14 ноября 2014). – Москва: ИКИ РАН, 2014. С. 117.
- [10] Чубаров, Д.Л., Добрецов, Н.Н., Кихтенко, В.А. Отображение модели данных netCDF в реляционную модель для работы с коллекциями данных дистанционного зондирования // Труды всероссийской конференции «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов», SDM-2017. 2017. С. 324–328
- [11] Kwo-Sen Kuo, Lynnes C.S., Ramachandran R. A. Proposed Earth Science Collaboratory for Remote Sensing Data Analysis // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2012. V.5, No.6. P. 1612-1616.
- [12] Acker J. G., Leptoukh G. Online analysis enhances use of NASA Earth science data // EOS Trans. AGU, 2007. V 88, No 2. P. 14–17.
- [13] Hansen, M.C. Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V, Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover // Science. 2013. V. 342, No. 6160. P. 850–853.
- [14] Koubarakis M., Datcu M., Kontoes C. Di Giammatteo U., Manegold, S. Klien E. TELEIOS: a database-powered virtual earth observatory // Proceedings of the VLDB Endowment ,2012.Vol. 5, No. 12. P. 2010-2013.
- [15] Doty B.E., Kinter J.L. Geophysical data analysis and visualization using the Grid Analysis and Display System // Visualization Techniques in Space and Atmospheric Sciences, NASA SP-519, 1995. P. 209-217.
- [16] Ivanova M., Kersten M.L., Manegold S. Data Vaults: A Symbiosis Between Database Technology And Scientific File Repositories // Proceedings of International Conference on Scientific and Statistical Database Management, 2012. P. 485-494.
- [17] Tramutoli V., Di Bello G., Pergola N., Piscitelli S. Robust satellite techniques for remote sensing of seismically active areas // Ann. di Geofis. V.44, No 2.P. 295-312.
- [18] Воронина П. В., Чубаров, Д. Л., Кихтенко, В. А. Статистические отклонения в пространственно-временных рядах спутниковых данных температуры поверхности Земли на территории юга Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2017. Т. 4. No 2. С. 46–50.
- [19] Menenti M., Azzali S., Verhoef W., Van Swol R. Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images // Advances in Space Research. V. 13, No. 5. P. 233–237.
- [20] Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С., Пестунов И.А., Синявский Ю.Н., Чубаров Д.Л., Безбородова А.Н., Ермаков Н.Б. Картографическое моделирование температурных полей почв Среднесибирского трансекта на основе совместного анализа наземных автоматизированных и спутниковых данных температурного мониторинга (в настоящем сборнике).