

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСЕНИЯ

УДК 621.396

**Программные технологии создания
и распространения базовых продуктов
дистанционного зондирования Земли**

А. И. Васильев¹, А. П. Коршунов², Н. А. Ольшевский, А. С. Стремов

¹к. ф.-м. н., ²к. т. н.

АО «Российские космические системы»

e-mail: a.vasilyev@ntsomz.ru

Аннотация. В статье рассматривается облик разрабатываемого единого комплекса программно-аппаратных средств формирования и ведения банка базовых продуктов (БП) дистанционного зондирования Земли межведомственного использования. Приводится технологическая модель функционирования и компоненты комплекса. Подробно рассматриваются особенности технических, программных и алгоритмических решений компонент создания и распространения БП.

Ключевые слова: банк базовых продуктов ДЗЗ, алгоритмы создания базовых продуктов ДЗЗ, технологии распространения данных ДЗЗ, ЕК ББП

**Software Technologies for Generation
and Distribution of Basic Earth
Remote Sensing Data Products**

A. I. Vasilyev¹, A. P. Korshunov², N. A. Olshevskiy, A. S. Stremov

¹candidate of physical and mathematical science, ²candidate of engineering science,

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: a.vasilyev@ntsomz.ru

Abstract. The outline of the integrated complex of automated soft- and hardware tools designed for generating and maintaining the basic Earth remote sensing data products bank of interagency application being developed is considered in the paper. The technological functioning model of the complex and its components are described. Features of technical, software and algorithmic solutions for basic products generation and distribution are considered.

Key words: basic Earth remote sensing data products bank, algorithms for basic Earth remote sensing data products generation, technologies of Earth remote sensing data distribution, ЕК ББП

Введение

Базовые продукты дистанционного зондирования Земли (БП ДЗЗ) являются общей основой для многоцелевой тематической интерпретации в интересах решения задач ведомственных и региональных потребителей и представляют собой наборы данных, на основе которых могут быть получены различные физические (или псевдофизические) характеристики наблюдаемых территорий, явлений и/или объектов, и обеспечивают решение следующих задач:

- слежение за долговременной изменчивостью контролируемых объектов;
- построение карты восстанавливаемых по дистанционным данным физических параметров подстилающей поверхности;
- сопоставление данных, полученных различными сенсорами;
- валидация восстановленных по дистанционным наблюдениям геофизических параметров, описывающих физические объекты;
- получение исходной устойчивой информации для моделирования развития различных явлений и процессов.

В работе [1] авторы определяют свойства БП ДЗЗ и предлагают уровни представления БП, адаптированные к классификации CEOS:

БП уровня 1 — продукты, содержащие «обобщенные физические», привязанные к одному сеансу (сцене) данные, этот уровень является подмножеством уровня 2G CEOS;

БП уровня 2 — привязанные к фиксированному времени (временные) композиты, полученные на основе наблюдений за некоторый период времени и аппроксимированные на фиксированную пространственную сетку (соответствуют подмножеству продуктов уровня 3T CEOS);

БП уровня 3 — производные продукты, которые получают на основе продуктов уровня 2 путем аппроксимации данных на различные временные и пространственные сетки (соответствуют подмножеству продуктов уровня 3D CEOS).

В рамках данной работы предлагается расширить классификацию путем введения БП уровня 0,

более того, для рассматриваемых БП будут использоваться следующие обозначения: БП уровня 0 — *первичные БП*, БП уровня 1 — *вторичные БП*, БП уровня 2 — *композитные изображения*. Под первичным БП будем понимать продукт стандартной обработки данных ДЗЗ уровня 1С (1D) CEOS и представленный в следующих физических величинах:

- 1) для оптико-электронной аппаратуры это физические величины энергетической яркости (ЭЯ) на зрачке сенсора (спектральная плотность энергетической яркости);
- 2) для радиолокационной аппаратуры это амплитуда откликов сигнала.

Кроме того, в работе для композитных изображений используется следующее ограничение: композитные изображения формируются только на основе первичных базовых продуктов уровня, соответствующего уровню 1D CEOS.

Целесообразность создания набора технологий для создания и ведения банка базовых продуктов межведомственного использования обусловливается возможностью экономии бюджетных средств [2].

Далее в работе рассматривается облик разрабатываемого единого комплекса автоматизированных программно-аппаратных средств формирования и ведения банка базовых продуктов (ЕК ББП) ДЗЗ межведомственного использования, реализующий SaaS (software as a service) бизнес-модель (см. рис. 1). Подробно рассматриваются особенности программных и алгоритмических решений компонент создания и распространения БП. В заключении сформулированы основные результаты работы.

Облик ЕК ББП

Структурно-функциональная модель ЕК ББП представлена на рис. 2. В этой модели выделены следующие основные компоненты:

- компонента администрирования ресурсами (АР) — реализует взаимодействие между другими компонентами ЕК ББП и обеспечивает масштабирование системы на уровне создания новых центров обработки и новых типов

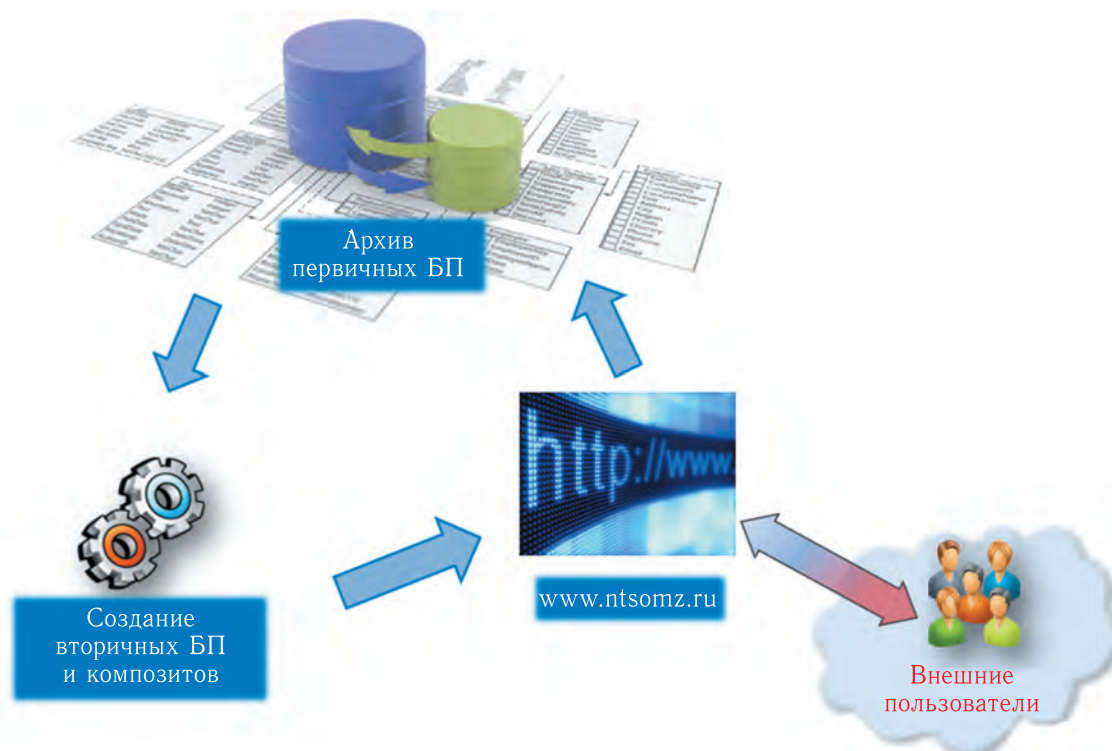


Рис. 1. Бизнес-модель web-сервиса ЕК ББП

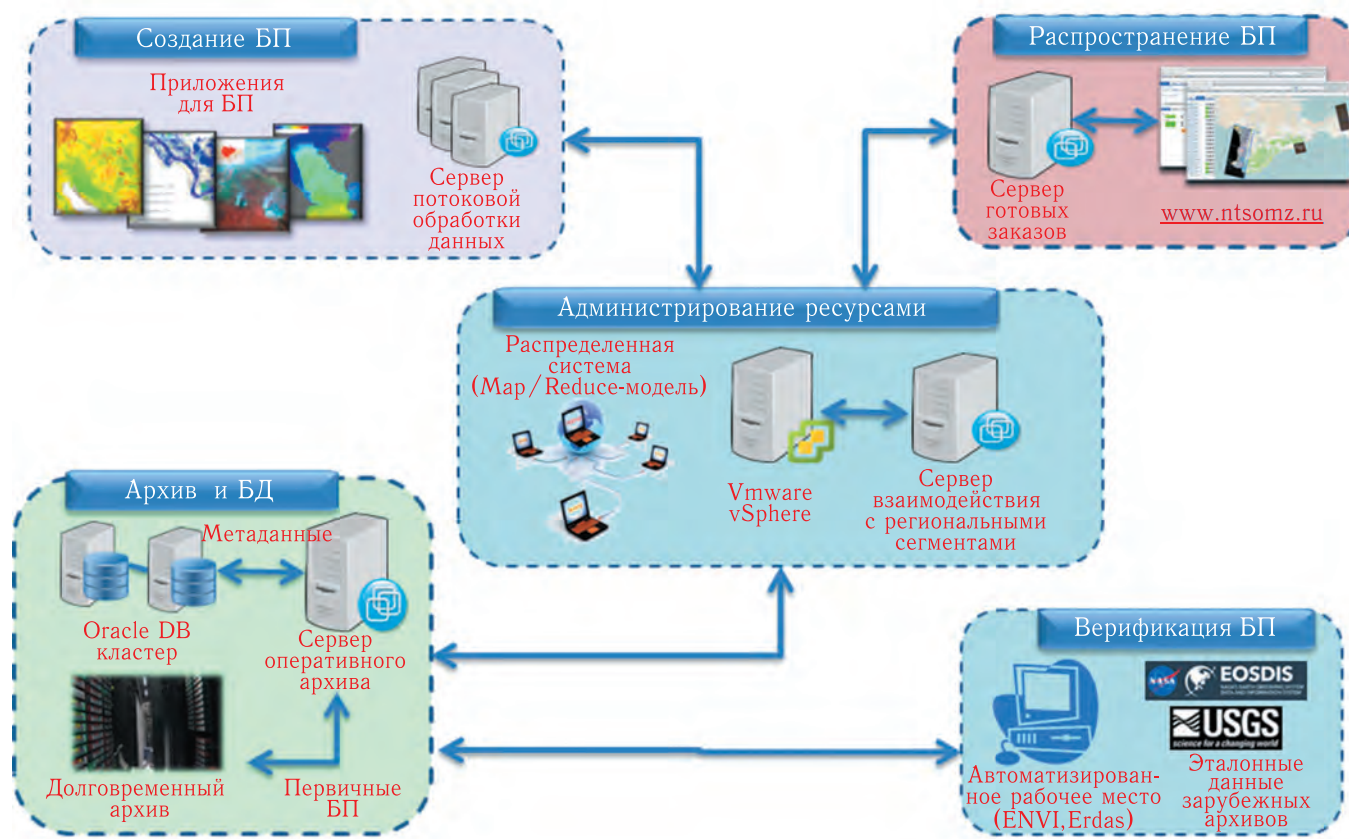


Рис. 2. Структурно-функциональная модель ЕК ББП

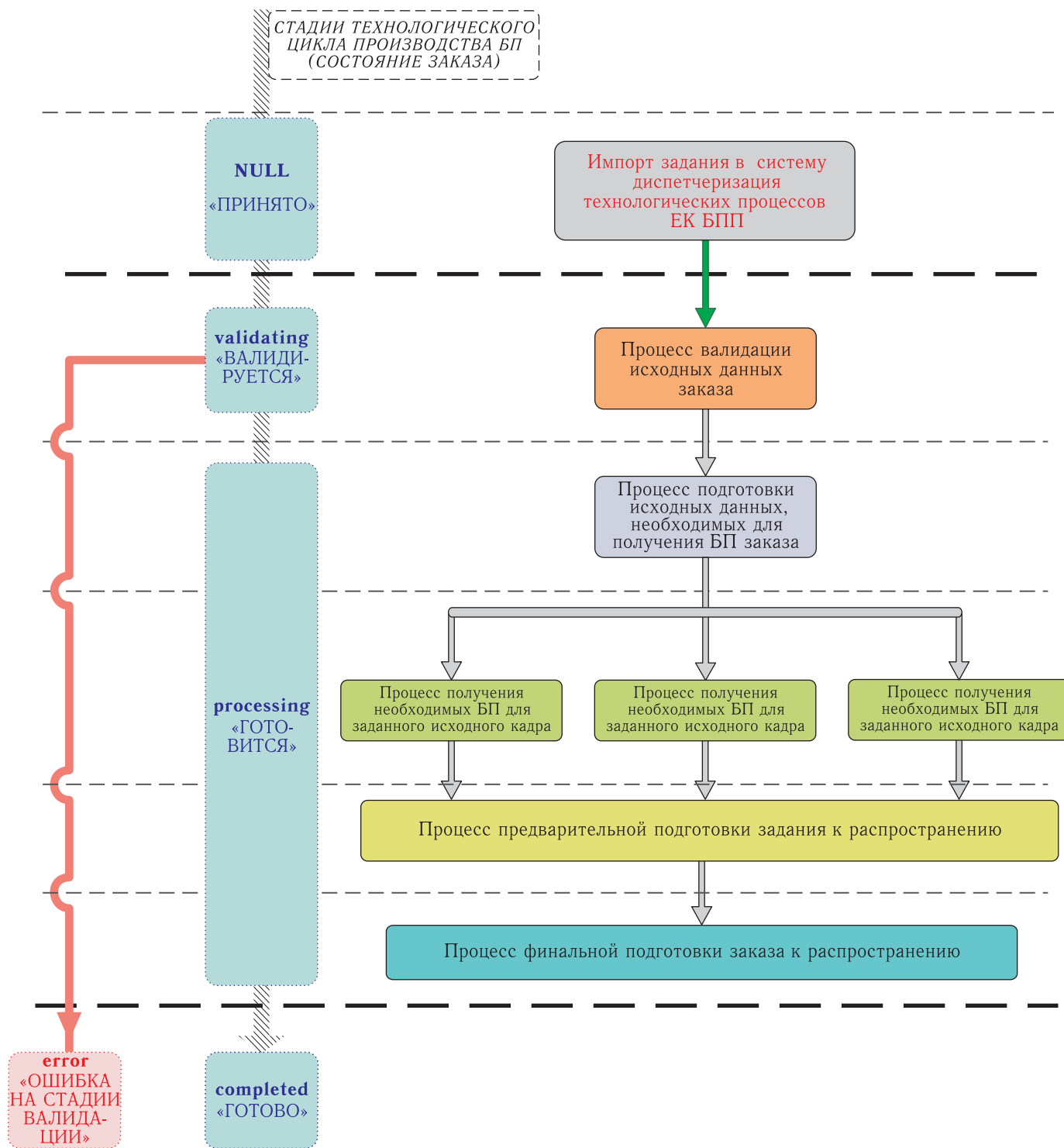


Рис. 3. Технологическая схема выполнения заказа по формированию БП ДЗЗ

базовых продуктов посредством реализованной в рамках компоненты программной модели Map/Reduce;

- программно-аппаратные средства архивирования и каталогизации (ПАС АК) осуществляют ведение структуры каталога и доступ к архи-

ву первичных БП, база данных БП ДЗЗ спроектирована на основе СУБД Oracle и развернута на аппаратных средствах ЕК ББП с использованием технологии Oracle Real Application Clusters. Долговременное хранилище первичных БП содержит множество zip-архивов, внутри которых хранятся растровые данные и метаданные в формате xml;

- автоматизированное рабочее место верификации БП поддерживает набор технологий верификации БП ДЗЗ на основе техник сопоставления данных ДЗЗ российских и зарубежных КА, таких как Landsat 7, Landsat 8, Terra/Aqua, EO-1 (доступ к открытым архивам зарубежных данных ДЗЗ реализуется по каналам Интернета);
- компонента создания БП включает набор приложений для формирования вторичных БП и приложение для формирования композитных изображений;
- компонента распространения БП включает Web-API и web-интерфейс для программного и персонального доступа к сервису соответственно.

Технологическая схема выполнения заказа продемонстрирована на рис. 3 и включает следующие основные этапы:

- 1) формирование заказа авторизованным клиентом/пользователем на основе Web-API (запись параметров заказа в БД ЕК ББП);
- 2) импорт заказа в систему АР;
- 3) проверка корректности исходных данных заказа;
- 4) подготовка исходных данных для выполнения заказа;
- 5) формирование БП заказа;
- 6) подготовка выполненного заказа к распространению;
- 7) экспорт заказа из системы администрирования;
- 8) доступ к выполненному заказу авторизованным клиентом/пользователем на основе HTTP-ссылки.

Программная компонента создания БП ДЗЗ

Компонента создания БП обеспечивает создание БП следующих тематических групп:

- 1) расчет спектрального коэффициента отражения (СКО) на верхней границе атмосферы (ВГА) по данным оптико-электронной аппаратуры;
- 2) расчет спектральных индексов по данным оптико-электронного оборудования;
- 3) формирование композитных изображений по данным мультиспектральных изображений.

Поскольку способ хранения базовых продуктов в долговременном архиве подразумевает наличие растровых данных в 8- или 16-битном представлении целочисленных значений, определим правила перехода к физическим величинам для растровых данных, представленных в цифровых отсчетах. Для этого будем использовать линейное преобразование в виде (1):

$$PV = \text{gain} \cdot DN + \text{offset}, \quad (1)$$

где:

PV — значение некоторой физической величины;

DN — значение цифрового отсчета;

$\{\text{gain}, \text{offset}\}$ — пара параметров перехода к физическим величинам, указанным в сопроводительной информации, поставляемой совместно с БП.

Приложение для расчета СКО на ВГА по данным оптико-электронного оборудования

Расчет СКО по данным ОЭА реализуется в соответствии с соотношением (2):

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot D^2}{S_{\lambda} \cdot \cos \theta}, \quad (2)$$

где:

ρ_{λ} — СКО на ВГА для заданного канала сенсора;

L_{λ} — значение величины СПЭЯ, фиксируемой датчиком для заданного канала, Вт/(м²·ср·мкм);

D — расстояние от Земли до Солнца в а.е. на дату съемки;

Т а б л и ц а 1. КА ДЗЗ, оборудованные мультиспектральными сенсорами

Космический аппарат	Мультиспектральный сенсор	Разрешение, м	Актуальные каналы			
			Red	Green	Blue	NIR
«Метеор-М» № 2	КМСС	60	+	+	–	+
«Ресурс-П» № 1	КШМСА-СР	120	+	+	+	+
Landsat-7	ETM+	30	+	+	+	+
Landsat-8	OLI	30	+	+	+	+

Т а б л и ц а 2. Спектральные индексы, рассчитываемые по данным мультиспектральных изображений

Название	Формула	Диапазон
Normalized Difference Vegetation Index (Нормализованный разностный вегетационный индекс)	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	$[-1; 1]$ Растительность — $[0,2; 0,8]$
Simple Ratio (Простое соотношение инфракрасный/красный)	$SR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$	$[0; 30]$ Растительность — $[2; 8]$
Simple Ratio Red/Green (Простое соотношение красный/зеленый)	$RGR = \frac{\rho_{RED}}{\rho_{GREEN}}$	$[0,1; 8]$ Растительность — $[0,7; 3]$
Atmospherically Resistant Vegetation Index (Вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы)	$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - 2\rho_{RED} - \rho_{BLUE}}{\rho_{NIR} + 2\rho_{RED} - \rho_{BLUE}}$	$[-1; 1]$ Растительность — $[0,2; 0,8]$
Enhanced Vegetation Index (Усовершенствованный вегетационный индекс)	$EVI = \frac{\rho_{NIR} - 2\rho_{RED}}{\rho_{NIR} + 6\rho_{RED} - 7,5\rho_{BLUE} + 1}$	$[-1; 1]$ Растительность — $[0,2; 0,8]$

S_{λ} — средняя солнечная внеатмосферная энергетическая освещенность (солнечная постоянная), Вт/(м²·ср·мкм);

θ — зенитное расстояние Солнца (рассчитывается для заданных пространственно-временных координат в соответствии с [3]).

Солнечная постоянная для конкретного спектрального канала вычисляется на основе формулы (3):

$$S_{\lambda} = \frac{\int f_s \cdot f_{\lambda} \cdot d\lambda}{\int f_{\lambda} \cdot d\lambda}, \quad (3)$$

где f_{λ} — функция чувствительности заданного канала сенсора;

f_s — функция спектра Солнца [4].

Формирование новых растровых изображений целесообразно только для широкозахватных сенсоров типа КМСС КА «Метеор-М». Для узкозахватных сенсоров (ширина захвата менее 200 км) расчет СКО сводится к коррекции параметров перехода к физическим величинам {gain, offset}.

Приложение для расчета спектральных индексов по данным оптико-электронного оборудования

Расчет спектральных индексов для оптико-электронной аппаратуры реализуется на основе данных в физических величинах СКО на ВГА. Индексы вегетации, рассчитываемые по данным мультиспектральной аппаратуры (см. табл. 1), представлены в табл. 2. Индексы вегетации, рассчитываемые по данным гиперспектральной аппаратуры КА «Ресурс-П», представлены в табл. 3.

По результатам работы приложения расчета спектральных индексов формируется растровое изображение в 16-битном представлении целочисленных значений, сопровождаемое параметрами перехода к актуальным диапазонам вторичных БП. Примеры вторичных БП, соответствующих спектральным индексам, рассчитанных на основе данных сенсора КМСС КА «Метеор-М» № 2, представлены на рис. 4.

Таблица 3. Отдельные рассматриваемые спектральные индексы, рассчитываемые по данным гиперспектральных изображений КА «Ресурс-П» № 1

Название	Формула	Диапазон
Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (Нормализованный разностный вегетационный индекс 750/705)	$NDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705}}$	$[-1; 1]$ Растительность $[0,2; 0,9]$
Modified Red Edge Simple Ratio Index (Модифицированное простое отношение 750/705)	$mSR_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{445}}{\rho_{705} + \rho_{445}}$	$[0; 30]$ Растительность $[2; 8]$
Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (Модифицированный нормализованный разностный вегетационный индекс 750/705)	$mNDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705} - 2 * \rho_{445}}$	$[-1; 1]$ Растительность $[0,2; 0,7]$
Vogelmann Red Edge Index 1 (Индекс 1 Вогельмана для области ближнего инфракрасного)	$VOG1 = \frac{\rho_{740}}{\rho_{720}}$	$[0; 20 >]$ Растительность $[4; 8]$
Vogelmann Red Edge Index 2 (Индекс 2 Вогельмана для области ближнего инфракрасного)	$VOG2 = \frac{\rho_{734} - \rho_{747}}{\rho_{715} + \rho_{726}}$	$[0; 20]$ Растительность $[4; 8]$
Photochemical Reflectance Index (Нормализованный разностный индекс фотохимического отражения волн)	$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}}$	$[-1; 1]$ Растительность $[-0,2; 0,2]$
Structure Insensitive Pigment Index (Индекс поглощения основными пигментными структурами)	$SIPi = \frac{\rho_{800} - \rho_{445}}{\rho_{800} - \rho_{680}}$	$[0; 2]$ Растительность $[0,8; 1,8]$

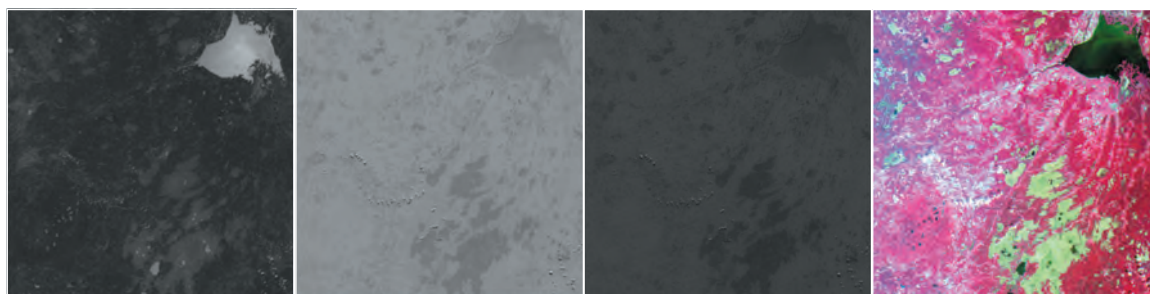


Рис. 4. Примеры БП (слева направо — NDVI, SR, RGR), рассчитанных по данным КМСС КА «Метеор-М» (крайний справа)

Формирование композитного изображения по данным мультиспектральных сенсоров

С целью формирования композитных изображений на основе двух мультиспектральных изображений был разработан следующий алгоритм:

1. Приведение растровых данных к самому крупному разрешению (из рассматриваемых данных).
2. Выбор опорного первичного БП (в качестве опорного выбирается тот, съемка которого была произведена раньше).
3. Проецирование изображений (каналов) первичных БП в картографическую проекцию опорного первичного БП (соответствующую зону проекции UTM).

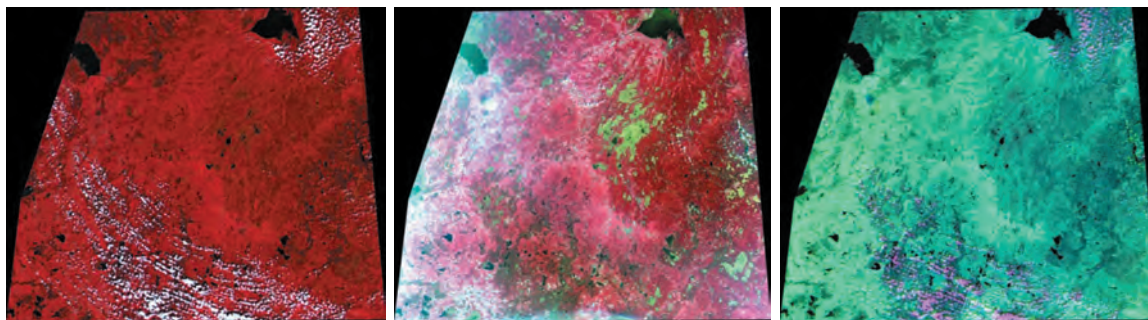


Рис. 5. Примеры сформированного композитного изображения (справа) с использованием разработанного приложения. Исходные данные: MODIS (слева), КМСС «Метеор-М» № 1 (в центре)

4. Приведение к цифровым отсчетам опорного изображения (радиометрическая коррекция):

$$DC_2 = \frac{gain_1}{gain_2} DC_1 + \frac{offset_1 - offset_2}{gain_2}, \quad (4)$$

где $\{gain_1, offset_1\}$ — пара параметров перехода к физическим величинам опорного изображения (для соответствующего канала); $\{gain_2, offset_2\}$ — пара параметров перехода к физическим величинам неопорного изображения (для соответствующего канала).

5. Формирование композитного изображения в формате RGB (на основе комбинации, представленной в табл. 4).

Таблица 4. Комбинация каналов для построения композитного изображения

Red	Green	Blue
Red ₂	NIR ₂	NIR ₁

На рис. 5 показан результат формирования композитного изображения по данным MODIS КА Terra/Aqua и КМСС КА «Метеор-М» (съемка выполнена в июне 2012 г.). В качестве опорного изображения был выбран снимок MODIS. Наиболее заметным объектом является облачность на композитном изображении, она подсвечивается розовым цветом.

Программная компонента распространения БП ДЗЗ

Программная компонента распространения включает два основных модуля доступа к сервисам банка базовых продуктов: программный доступ

на основе Web-API и персональный доступ пользователей по средствам web-интерфейса. Следует отметить, что доступ к сервисам из web-интерфейса реализуется также на основе обращений к Web-API.

На рис. 6 представлена архитектура web-приложения компоненты распространения при обращении пользователей к сервисам ЕК ББП посредством Web-API. Ключевыми особенностями предложенной архитектуры является:

- 1) доступ к сервисам по протоколу HTTPS (поддерживает шифрование), обеспечивающему доступ к сервисам только авторизованных клиентов/пользователей;
- 2) система, масштабируемая с учетом увеличения количества клиентов/пользователей.

Web-интерфейс системы распространения реализует следующий основной функционал (скриншот web-интерфейса представлен на рис. 7):

- 1) задание области интереса с использованием картографической основы;
- 2) задание критериев поиска, таких как диапазон дат, процент облачности, углы съемки КА для центра кадра, углы Солнца для центра кадра и другие;
- 3) просмотр уменьшенных копий изображений (quicklook) найденных кадров;
- 4) выбор вторичных БП для отобранных кадров;
- 5) выбор пар кадров для формирования композитных изображений БП для отобранных кадров;
- 6) возможность мониторинга состояния готовности заказа в «личном кабинете»; возможность

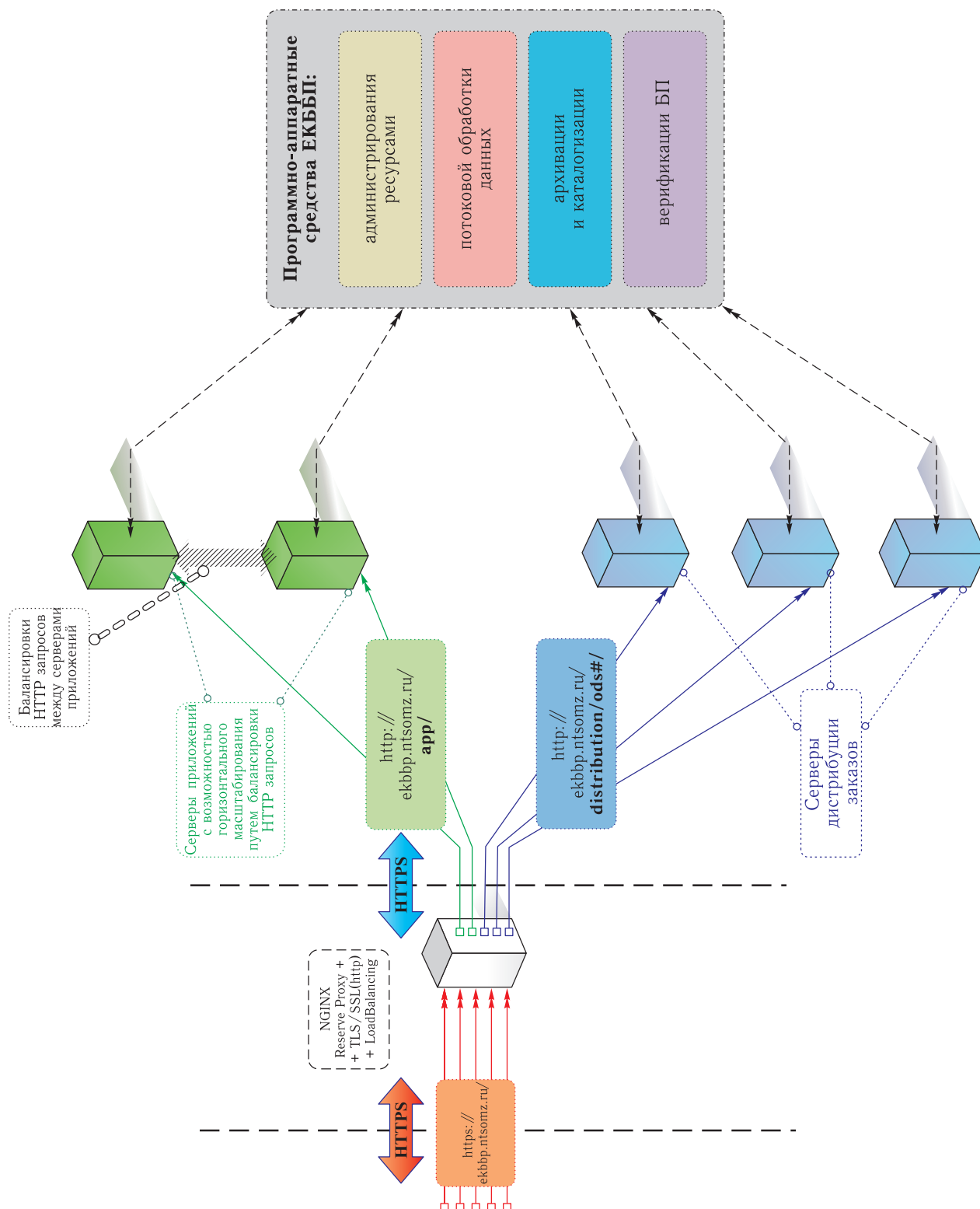


Рис. 6. Архитектура web-приложения компоненты распространения БП Д33

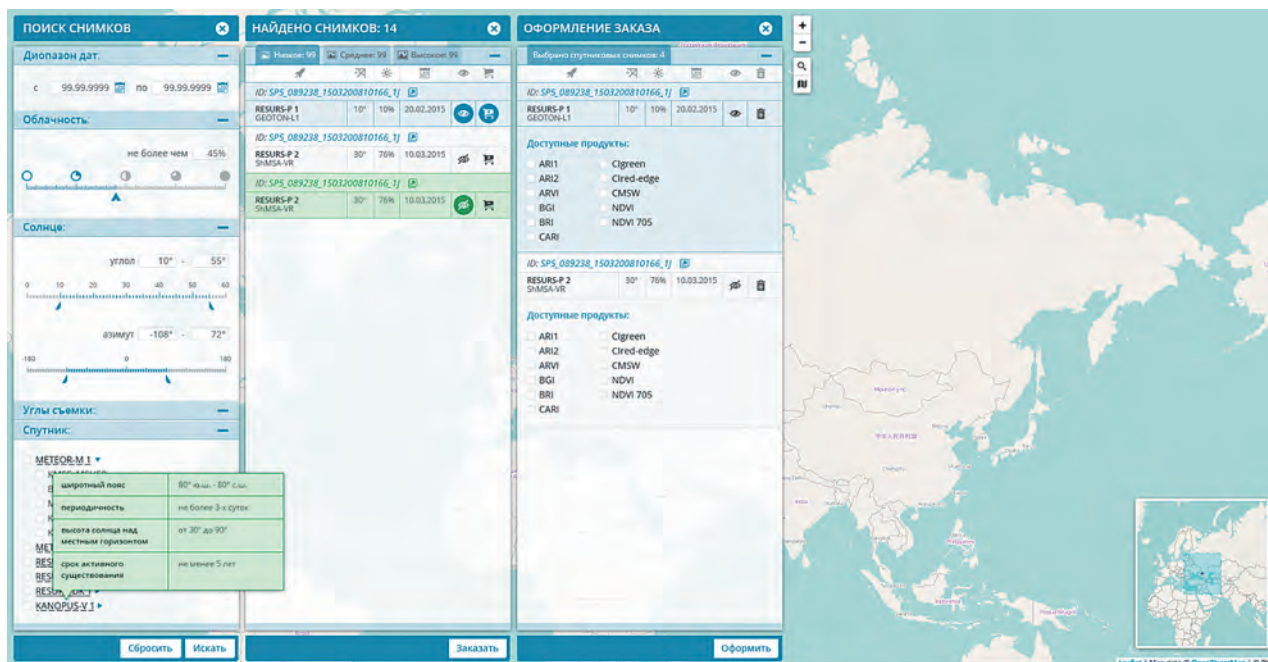


Рис. 7. Скриншот web-интерфейса компоненты распространения БП ДЗЗ

скачивания выполненного заказа в течение регламентированного промежутка времени (не более 14 дней).

Закключение

В рамках статьи рассмотрен создаваемый ЕК ББП как геоинформационный web-сервис. Доступ к различным базовым продуктам реализован посредством компоненты распространения, обеспечивающей персональный и абонентский доступ. Для формирования БП (по данным оптико-электронной аппаратуры) были разработаны приложения: расчет СКО на ВГА; расчет спектральных индексов; формирование мультिवременных композитов. Доступ к банку базовых продуктов планируется организовать после его введения в эксплуатацию в начале 2016 г.

Список литературы

1. Лупян Е.А., Саворский В.П. Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы ДЗЗ из космоса, 2012, т. 9, № 2, с. 87–96.
2. Урличич Ю.М., Селин В.А., Емельянов К.С. О приоритетах практической реализации развития космической системы дистанционного зондирования Земли // Наука и технологии в промышленности, 2012, № 1, с. 71–80.
3. Blanco-Muriel M. et al. Computing the Solar Vector // Solar Energy, 2001, vol. 70, № 5, p. 431–441.
4. Thuillier G. et al. The Solar Spectral Irradiance from 200 to 2400 nm as Measured by the SOLSPEC Spectrometer from the ATLAS and EURECA Missions // Solar Physics, 2003, 214:1–22.