



Оценка эффективности информационных систем обработки данных дистанционного зондирования Земли

¹ А.И. Васильев, ORCID: 0000-0002-7258-8670 <ahbac@mail.ru>

² С.М. Соколов, ORCID: 0000-0001-6923-2510 <sokolsm@list.ru>

¹ Научный центр оперативного мониторинга Земли

АО «Российские космические системы»,

Россия, 127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51, строение 25.

² Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,

Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д.4.

Аннотация. Современные тенденции развития космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) выдвигают самые высокие требования к доступности и оперативности предоставления космической информации потребителям. Для этого разработчиками предлагаются различные информационные системы и программные платформы обработки данных и формирования информационных продуктов ДЗЗ. При этом, несмотря на самое широкое разнообразие прикладных тематических задач дистанционного мониторинга, исследователями определен типовой компонентный состав для создания специализированных информационных систем ДЗЗ. Вместе с тем, выбор конкретной архитектуры информационной систем обработки данных ДЗЗ обуславливается реализуемыми технологическими процессами, а также особенностями используемой информационно-вычислительной инфраструктуры. Учитывая, что до настоящего времени исследователями не разработаны критерии эффективности информационных систем потокового формирования информационных продуктов ДЗЗ, то оценка предлагаемых разработчиками архитектур информационных систем (и их реализаций) допустима преимущественно на качественном уровне. В рамках настоящей работы предлагается подход для количественной оценки эффективности информационных систем обработки данных ДЗЗ, представляющих собой совокупность последовательных технологических процессов, реализованных на базе типовых компонентов. С использованием предлагаемого подхода проанализирована архитектура геоинформационного сервиса, представляющего собой программную платформу потокового формирования высокоуровневых информационных продуктов ДЗЗ. Показаны пути повышения эффективности данной программной платформы, а также определены возможности перераспределения вычислительных ресурсов, при той же эффективности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли; информационные системы; потоковые технологии; программные платформы; архитектура; информационные продукты; технологические процессы; эффективность.

Для цитирования: Васильев А.И., Соколов С.М. Оценка эффективности информационных систем обработки данных дистанционного зондирования Земли. Труды ИСП РАН, том 38, вып. 4, часть 1, 2026 г., стр. 183–200. DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(4)-10.

Efficiency evaluation of the information systems for the data processing of the Earth remote sensing

¹ A.I. Vasilyev, ORCID: 0000-0002-7258-8670 <ahbac@mail.ru>

² S.M. Sokolov, ORCID: 0000-0001-6923-2510 <sokolsm@list.ru>

¹ Research Center for Earth Operative Monitoring of JSC "Russian Space Systems",
51, Dekabristov str., Moscow, 127490, Russia.

² Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences,
4, Miusskaya sq., Moscow, 125047, Russia.

Abstract. Modern trends in the development of space systems (SS) for Earth remote sensing (ERS) put forward the highest demands on the availability and efficiency of providing space information to consumers. For this purpose, developers propose various information systems and software platforms for data processing and the formation of ERS information products. Despite the widest variety of applied thematic tasks of remote monitoring, researchers have defined a typical component composition for the creation of specialized ERS information systems. At the same time, the choice of a specific architecture of ERS data processing information systems is determined by the implemented technological processes, as well as the features of the information and computing infrastructure used. Considering that researchers have not yet developed criteria for the effectiveness of information systems for the streaming generation of ERS information products, the evaluation of the information system architectures (and their implementations) proposed by developers is performed primarily at a qualitative level. In this paper, we propose an approach for quantitatively assessing the efficiency of ERS data processing information systems, which represent a set of sequential technological processes implemented on the basis of typical components. Using the proposed approach, we analyzed the architecture of the geoinformation service, which is a software platform for the streaming formation of high-level ERS information products. The ways of increasing the efficiency of this software platform are shown, and the possibilities of redistributing computing resources with the same efficiency are determined.

Keywords: Earth remote sensing; information system; streaming technologies; software platform; architecture; information products; technological process; efficiency.

For citation: Vasilyev A.I., Sokolov S.M. Efficiency evaluation of the information systems for the data processing of the Earth remote sensing. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 38, issue 4, part 1, 2026, pp. 183-200 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(4)-10.

1. Введение

Современные тенденции (2026 год) развития космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) выдвигают самые высокие требования к оперативности и доступности космической информации потребителям. Для этого операторами КС ДЗЗ (а именно, организациями, обеспечивающими целевое применение КС ДЗЗ в части съемки, обработки и распространения данных ДЗЗ) активно применяются облачные сервисы и платформы (см., в частности, [1-2]). При этом с целью оперативности решения прикладных задач с использованием космической информации ДЗЗ для потребителей наблюдаются два основных подхода. Во-первых, операторами КС помимо предоставления данных съемки обеспечивается формирование и распространение множества основных видов специализированных информационных продуктов. Основные уровни обработки данных ДЗЗ, определенные Комитетом по спутникам наблюдения Земли CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) и соответствующие им виды информационных продуктов приведены в табл. 1. Во-вторых, данные и информационные продукты ДЗЗ, формируемые на средствах операторов КС ДЗЗ, мигрируют в коммерческие облачные хранилища, в том числе обеспечивающие возможность обработки и прикладного тематического анализа данных и временных рядов данных ДЗЗ с использованием предоставляемой компаниями для потребителей специализированной программной инфраструктуры. Например, на основе облачного сервиса Amazon [3] распространяются открытые данные зарубежных КС ДЗЗ

Terra/Aqua, Landsat, Sentinel. В свою очередь коммерческая компания Planet помимо собственной платформы [4] для предоставления данных и продуктов ДЗЗ использует облачные хранилища Amazon, Google, Microsoft, Oracle [5].

Табл. 1. Классификация уровней обработки данных ДЗЗ CEOS.

Table 1. Classification of CEOS Remote Sensing Data Processing Levels.

Уровень обработки	Описание информационного продукта	Примеры информационных продуктов
L0	Исходные «сырые» данные, зарегистрированные сенсором	–
L1	Данные ДЗЗ, прошедшие радиометрическую и геометрическую коррекцию. Опционально приведены к заданной картографической проекции	Изображения снимков местности, представленные в естественных или псевдоцветах
L2	Геофизические величины, рассчитанные по данным ДЗЗ, прошедшим радиометрическую и геометрическую коррекцию	Изображения вегетационных индексов, индексы снежного покрова и облачного покрова и др.
L3	Мозаичные покрытия, сформированные на основе данных ДЗЗ или геофизических величин	Глобальные изображения температуры водной поверхности, сформированные по данным суточной или месячной съемки
L4	Информация, извлеченная на основе данных более низких уровней (например, дешифрирование и идентификация объектов интереса)	Координаты точек очагов пожаров, границы разливов наводнений

Соответственно, для разработки современных информационных систем и программных платформ обработки данных и формирования информационных продуктов ДЗЗ допустимы различные концептуальные модели:

- 1) создание программных технологий на базе собственной вычислительной инфраструктуры;
- 2) использование вычислительной инфраструктуры коммерческих облачных хранилищ;
- 3) комбинированные решения на основе собственных вычислительных средств и коммерческих облачных хранилищ.

Далее подробнее рассматриваются информационные системы и технологии обработки данных ДЗЗ, соответствующие первой модели. Данное обстоятельство, в том числе обуславливается имеющимися ограничениями (с 2022 года по настоящее время) по использованию в РФ зарубежных коммерческих облачных хранилищ, наиболее специализированных для создания информационных систем обработки данных и формирования информационных продуктов ДЗЗ.

2. Обзор подходов к построению информационных систем и сервисов обработки данных ДЗЗ

С учетом стремительного за последние десятилетия роста объемов данных ДЗЗ [6] и их доступности наметилась тенденция в создании информационных систем и сервисов, обеспечивающих обработку данных с целью формирования и предоставления потребителям специализированных информационных продуктов ДЗЗ. Например, веб-сервис «Банк базовых продуктов» [7] предназначен для формирования и предоставления L2 и L3-продуктов на основе данных российских и зарубежных КС ДЗЗ. «Цифровая земля – сервисы» [8] – обеспечивает формирование тематических L4-продуктов по средствам автоматической «интеллектуальной» обработки данных ДЗЗ. Сервис «Вега-PRO» [9] – представляет собой

аналитический инструмент для оценки состояния земель сельхоз назначения на основе обработки временных рядов наблюдений, сформированных по данным ДЗЗ.

При этом, несмотря на достаточно широкое разнообразие самых различных по назначению систем и сервисов обработки и формирования информационных продуктов ДЗЗ, в [10] представлена обобщенная концепция создания такого класса информационных систем и программных платформ. В основе данной концепции авторы предлагают двухуровневую распределённую иерархическую систему, в рамках которой выделяют:

- 1) Центральный элемент – предназначен для формирования собственного облачного хранилища данных и информационных продуктов ДЗЗ. При этом для центрального элемента определены основные структурные компоненты: подсистема сбора данных, подсистема архивации данных, подсистема обработки данных, подсистема обеспечения доступа к данным и подсистема управления и контроля. Примером такого облачного хранилища данных и продуктов ДЗЗ является Центр коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» [11]. Особенности создания и эксплуатации ЦКП рассматриваются в [12].
- 2) Тематические элементы – представляют собой специализированные системы дистанционного мониторинга (СДМ), построенные полноценной либо частичной интеграцией вычислительных средств и технологий центрального и тематического элементов. Примеры таких СДМ для контроля лесных пожаров, исследований мирового океана, анализа вулканической активности также приведены в [12].

При этом схожий концепт используется в системе EOSDIS NASA [13], обеспечивающей ведение единого архива данных и предоставление различных информационных продуктов ДЗЗ потребителям (по средствам веб-сервиса [14]), формирование которых осуществляется на основе специализированной распределенной обработки данных архива в отдельных вычислительных центрах. В свою очередь, компонентный состав центрального элемента можно однозначно соотнести с решениями, разработанными, например, в рамках геоинформационного веб-сервиса [15, 16], распределённой системы приема и обработки СО РАН [17] или ЦКП регионального спутникового мониторинга ДВО РАН [18]. То есть компонентную модель информационных систем можно считать в значительной степени унифицированной.

При этом достаточно всеобъемлющий обзор подходов к непосредственной реализации компонентов архивирования и обработки данных ДЗЗ приведен в работе [19]. В частности, отмечается стратегия приведение растровых данных к специализированному COG-формату (COG – Cloud Optimized GeoTIFF [20]), а также применение объектных хранилищ и NoSQL баз данных для хранения изображений. Показана целесообразность реорганизации отснятых данных в части фрагментирования на основе регулярного грида и последующего объединения фрагментов в виде куба данных для мультитимеменного анализа. Для облачных вычислений рассматриваются схемы пакетной обработки данных, MapReduce-стратегия, параллельная обработка, включая контейнеризацию.

Таким образом, для информационных систем обработки данных и формирования информационных продуктов ДЗЗ исследователями определен типовой структурный облик архитектуры. При этом особенности используемых разработчиками технических решений, при реализации компонентов архитектуры, в значительной степени определяется задействуемыми вычислительными ресурсами с учетом требуемых показателей производительности. Вместе с тем, выбор технических решений мотивирован преимущественно качественной оценкой либо количественными показателями отдельных компонентов или их элементов (например, выбор параллельной/высокопроизводительной технологии обработки данных в значительной степени определяется доступными системами хранения данных [21]). Как следствие, задача интегральной количественной оценки эффективности информационных систем обработки данных ДЗЗ, как в части создания новых

систем, так и в части конфигурирования существующих, является востребованной. Учитывая, что экономическая эффективность информационных систем, в целом, является самостоятельным направлением исследований [22].

3. Производительность технологических процессов обработки данных ДЗЗ

Для рассматриваемой унифицированной совокупности структурных компонентов информационных систем допустима реализация множества самых различных технологических процессов сбора, обработки, хранения и предоставления данных и информационных продуктов ДЗЗ, реализуемых на базе выбранной архитектуры. Пример одной такой архитектуры (соответствует ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [12]) приведён на рис. 1, для которой можно выделить следующие технологические процессы:

- 1) сбор данных, их обработка и регистрация в архиве;
- 2) дополнительная обработка данных архива с последующей регистрацией в архиве продуктов обработки;
- 3) предоставление данных и продуктов обработки архива.

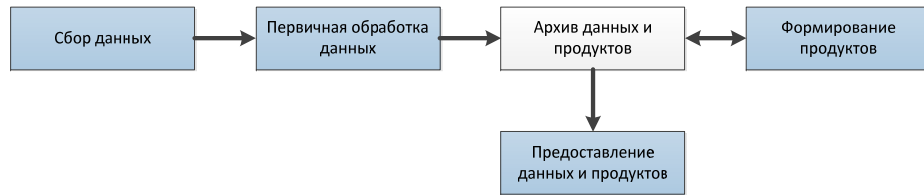


Рис. 1. Пример архитектуры информационной системы сбора, обработки, хранения и предоставления данных и информационных продуктов ДЗЗ.

Стрелками задано направление движения растровой информации.

Fig. 1. An example of the architecture of an information system for collecting, processing, storing, and providing remote sensing data and information products.

The arrows indicate the direction of movement of raster information.

Далее рассмотрим технологический процесс информационной системы в виде совокупности последовательных операций обработки данных, последовательно преобразующих исходные данные (см. рис. 2). В качестве примера таких операций выступают операции приведения информации ДЗЗ к заданным спецификациям и форматам хранения, многоуровневая фотограмметрическая L1-обработка, пред- и/или постобработка данных для формирования L3 информационных продуктов (например, в части коррекции картографической проекции, пространственного и радиометрического разрешения) и другие. При этом алгоритмы конкретной операции обработки могут выполняться как в параллельном, так и в конвейерном режиме. В свою очередь, совокупность таких операций образует последовательный технологический процесс (ТП).

Введём следующие определения:

Операция ТП – представляет собой процесс обработки данных, обеспечивающий на основе исходной информации формирование новых данных. При этом размер новых данных будем считать, зависящим от размера исходных данных следующим образом

$$V_i = k_i \cdot V_{i-1} \quad (1)$$

V_i – объем данных, сформированные на i -ой операции ТП;

k_i – коэффициент продуктивности, характеризует отношение размеров производных данных к исходным данным для i -ой операции ТП.



Рис. 2. Обобщённая схема

технологического процесса последовательных операций обработки данных ДЗЗ.

Fig. 2. Generalized flow chart of the technological process

for sequential processing operations of remote sensing data.

Производительность операции ТП – определяется как скорость выполнения операции, а именно отношение объема исходных данных к времени выполнения операции

$$\omega_i = \frac{V_{i-1}}{\Delta t_i} \quad (2)$$

Δt_i – времени формированию новых данных на i -ой операции ТП.

При этом на практике разработчики часто оценивают производительность, в том числе относительно результирующего объема продукции (особенно, если его размер превышает объем исходных данных). В рамках настоящего исследования производительность операции будем оценивать относительно объема исходных данных.

Последовательный технологический процесс – представляет собой совокупность операций обработки данных, так что на основе исходных данных обеспечивается формирование новых данных, размер которых можно оценить следующим образом

$$V_n = V_0 \cdot \prod_{j=1}^n k_j \quad (3)$$

V_0 – объем исходных данных;

V_n – объем результирующих новых данных.

Соответственно, **коэффициент продуктивности ТП**, состоящего из n операций, запишем в виде соотношения

$$K = \prod_{j=1}^n k_j \quad (4)$$

Предельное время обработки входных данных в ТП запишем следующим образом

$$T = \Delta t_1 + \dots + \Delta t_n \quad (5)$$

Δt_i – время выполнения i -ой операции ТП;

Перепишем (5) согласно (2):

$$\frac{V_0}{\Omega} = \frac{V_0}{\omega_1} + \dots + \frac{V_{n-1}}{\omega_n} \quad (6)$$

или с учетом (4):

$$\frac{1}{\Omega} = \frac{1}{\omega_1} + \sum_{i=2}^n \left(\frac{\prod_{j=1}^{i-1} k_j}{\omega_i} \right) \quad (7)$$

В таком случае **минимальная производительность ТП**, при последовательной обработке данных, может быть записана следующим образом:

$$\Omega_{inf}(\omega_1, \dots, \omega_n, k_1, \dots, k_{n-1}) = \left(\frac{1}{\omega_1} + \sum_{i=2}^n \left(\frac{\prod_{j=1}^{i-1} k_j}{\omega_i} \right) \right)^{-1} \quad (8)$$

В свою очередь конвейерная обработка данных позволяет определить минимальное время обработки данных в ТП последовательной обработки на основе соотношения

$$\Delta T = \max\{\Delta t_1, \dots, \Delta t_n\} \quad (9)$$

Соответственно производительность конвейерного ТП, при последовательной обработке данных, определяет **максимальную производительность ТП** следующим соотношением

$$\Omega_{sup}(\omega_1, \dots, \omega_n, k_1, \dots, k_{n-1}) = \min \left\{ \omega_1, \frac{\omega_2}{k_1}, \dots, \frac{\omega_n}{\prod_{j=1}^{n-1} k_j} \right\} \quad (10)$$

Таким образом, производительность технологического процесса последовательных операций обработки можно определить в следующих границах

$$\Omega_{inf} \leq \Omega(\omega_1, \dots, \omega_n, k_1, \dots, k_{n-1}) \leq \Omega_{sup} \quad (11)$$

При этом оптимальный по производительности операций ТП последовательной обработки (и соответственно задействуемых вычислительных ресурсов) обеспечивает минимальную задержку между операциями и удовлетворяет следующему условию

$$\left[\max \left\{ \omega_1, \frac{\omega_2}{k_1}, \dots, \frac{\omega_n}{\prod_{j=1}^{n-1} k_j} \right\} - \Omega(\omega_1, \dots, \omega_n, k_1, \dots, k_{n-1}) \right] \rightarrow \min \quad (12)$$

Далее рассмотрим пример типового ТП последовательной обработки, включающий загрузку данных на вычислительный сервер, обработку данных на сервере и выгрузку результатов в выходной буфер. Данный процесс, в том числе позволяет описать работу компонента формирования продуктов архитектуры информационной системы, приведённой на рис. 1.

Введём предположение, что производительность загрузки и выгрузки данных одинаковая и обеспечивается с одной и той же скоростью. В таком случае границы относительной производительности данного технологического процесса в соответствии с (8) и (10) можно записать следующим образом

$$\begin{cases} \frac{\Omega_{inf}}{\omega_0} = \left(1 + \frac{1}{\alpha} + k_p\right)^{-1} \\ \frac{\Omega_{sup}}{\omega_0} = \min \left\{ 1; \alpha; \frac{1}{k_p} \right\} \end{cases} \quad (13)$$

ω_0 – производительность операции загрузки/выгрузки данных на сервер;

ω_p – производительность операции обработки данных на сервере;

$\alpha = \omega_p / \omega_0$ – коэффициент производительности операции обработки;

k_p – продуктивность операции обработки.

Определим свойства (13) с учётом коэффициентов продуктивности, приведённых в табл. 2:

- 1) Производительность ТП ограничена сверху и снизу ω_0 , при минимальной продуктивности и максимальной скорости обработки

$$\begin{cases} \lim_{\alpha \rightarrow \infty} \frac{\Omega_{inf}}{\omega_0} = 1 \\ \lim_{k_p \rightarrow 0} \frac{\Omega_{sup}}{\omega_0} = 1 \end{cases} \quad (14)$$

- 2) Если продуктивность более 1 (характерно процессу формирования L1), то $\Omega_{inf} < \omega_0/2$ и $\Omega_{sup} < \omega_0$ независимо от α .
- 3) При существенном увеличении результирующих данных ($k_p \gg 1$), относительная производительность ТП обратно пропорциональна продуктивности. Данный фактор целесообразно учитывать при формировании множества индексных L2-продуктов, особенно при условии их невысокой вычислительной сложности. Например, используя соотношения [23, 24], допустимо рассчитать несколько десятков вегетационных индексов для съемочных систем, включающих основные природноресурсные спектральные каналы (характерные диапазоны – ближний инфракрасный, красный, зеленый и голубой).
- 4) Если продуктивность менее 1 (характерно процессу формирования L3 и одиночным L2-продуктам), относительная производительность ТП существенно зависит от скорости операции обработки (определяется параметром α).

Таким образом, приведённые теоретические модели позволяют определить граничные

оценки производительности технологических процессов последовательной обработки данных и формирования информационных продуктов ДЗЗ в рамках информационных систем.

Табл. 2. Коэффициенты продуктивности, характерные операциям обработки данных и формирования информационных продуктов ДЗЗ.

Table 2. Productivity coefficients for data processing operations and the formation of remote sensing information products.

Исходный	Результат	Коэффициент продуктивности	Примеры операций обработки и особенности операций
L0	L1	1...2	Распаковка принятых из космоса данных, трансформирования снимков в картографическую проекцию
L1	L2	1/N	Алгебраические операции между изображениями спектральных каналов. N – количество изображений спектральных каналов в L1-продукте
L1	L3	< 1	Объединение изображений множества отдельных снимков в единое цельное изображение

4. Критерий эффективности информационных систем обработки данных ДЗЗ

Эффективной информационной системой обработки данных ДЗЗ (ИС ДЗЗ) будем называть такую информационную систему, для которой с учётом доступной для её реализации информационно-технологической инфраструктуры обеспечивается производительность всех технологических процессов формирования информационных продуктов ДЗЗ относительно заданных требований

$$\Omega_q > [\Omega_q] \quad (15)$$

$[\Omega_q]$ – предельно-допустимый уровень эффективности для q-го технологического процесса. Соответственно, для заданной информационной системы критерием эффективности ИС ДЗЗ будет являться совокупная эффективность всех технологических процессов, рассматриваемая в виде средневзвешенной оценки следующим образом

$$\Psi(\{\Omega_q, [\Omega_q]\}) = \frac{\sum_{q=1}^N \mu_q H(\Omega_q, [\Omega_q])}{\sum_{q=1}^N \mu_q} \quad (16)$$

μ_q – весовой параметр q-го технологического процесса. Данный параметр определяется спецификой конкретной ИС ДЗЗ. В настоящей работе рассматриваются равновесовые технологические процессы;

N – количество технологических процессов последовательной обработки данных, реализованных в информационной системе;

$H(\Omega_q, [\Omega_q])$ – бинарная функция, в качестве которой может рассматриваться пороговая кусочно-постоянная функция (равная единице, если выполняется критерий (15), и нулю, если не выполняется), или гладкая сигмоида (см. рис. 3) следующего вида

$$H(\Omega_q, [\Omega_q]) = 1 / (1 - b^{\left[\frac{\Omega_q}{[\Omega_q]} - 1 \right]}) \quad (17)$$

$b = \exp(-\beta)$ – нормирующий коэффициент, определяет близость к кусочно-постоянной функции. В данной работе параметр β обеспечивал вид функции (см. рис. 3), для которой отклонение производительности ТП относительно предельно-допустимого уровня более 50% приводит к асимптотическим значениям.

Учитывая, что показатель продуктивности операций ТП, как правило, является неизменным для заданных процессов обработки конкретной съемочной системы ДЗЗ, то распределяя

вычислительные ресурсы с целью достижения требуемой производительности операций, обеспечивается поиск максимальной эффективности информационной системы на основе решения задачи многопараметрической оптимизации

$$\sum_{q=1}^N \left(1 - b \left[\frac{\Omega_q(\{\omega_{q,i}, k_{q,i}\})}{[\Omega_q]} - 1 \right] \right)^{-1} \rightarrow \max \quad (18)$$

$\omega_{q,i}$ – производительность i-й операции для q-го технологического процесса, $k_{q,i}$ – продуктивность данной операции.

Далее на примере архитектуры программной платформы формирования и предоставления высокоуровневых L2/L3 информационных продуктов рассматривается оценка ее эффективности в части обработки данных комплекса многозональной спутниковой съемки (KMCC) КА «Метеор-М» [25, 26].

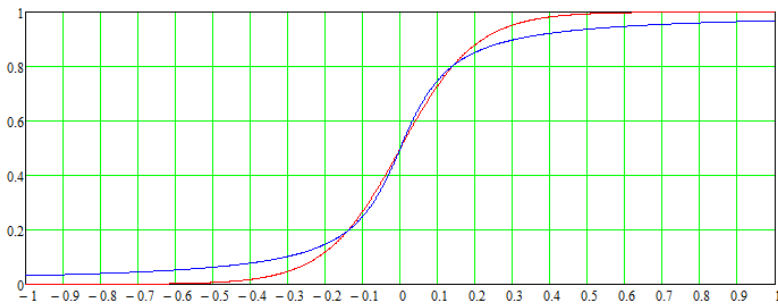


Рис. 3. Пример гладкой бинарной функции: красная – сигмоида, синяя – приведённая к заданному диапазону функция арктангенса (показана для сравнения степени "пологости").
Fig. 3. An example of a smooth binary function: red is the sigmoid, blue is the arctangent function reduced to a given range (shown for comparison of the degree of "flatness").

5. Оценка эффективности программной платформы формирования и предоставления высокоуровневых информационных продуктов ДЗЗ

На рис. 4 приведена архитектура программной платформы формирования и предоставления высокоуровневых информационных продуктов ДЗЗ. Данная программная платформа интегрирована в геоинформационный сервис [15, 16] и обеспечивает обработку данных российских КА ДЗЗ. Для этого в платформе реализованы технологические процессы обработки данных ДЗЗ, каждый из которых функционирует асинхронно относительно других процессов. Применительно к обработке данных KMCC КА «Метеор-М» можно выделить следующие процессы:

- 1) L1-процесс – включает операции загрузки L0-данных, принятых на антенные комплексы, на сервер обработки, фотограмметрическую обработку данных на сервере и формирование L1-продуктов, загрузку сформированных продуктов на шину данных (ШД). При этом для данных KMCC КА «Метеор-М» ежедневный приём L0-данных составляет – не более 70ГБ (для одного КА). В свою очередь фотограмметрическая обработка данных включает фрагментирование отснятых данных на условные кадры (обеспечивающие приблизительно квадратные сцены полосы захвата съёмочной системы) и формирование L1-продуктов сцен (в виде орторектифицированных изображений спектральных каналов каждого условного кадра) [27, 28];
- 2) L2-процесс – включает операции загрузки L1-продуктов из шины данных на сервер,

обработку данных на сервере и формирование L2-продуктов, загрузку сформированных продуктов на сервер распространения. При этом ежедневно потребители заказывают формирование L2-продуктов в среднем – не более 100 сцен. Элементы технологии формирования L2-продуктов KMCC КА «Метеор-М» №2 приведены в [29];

- 3) L3-процесс – включает операции загрузки L1-продуктов из шины данных на сервер, обработку данных на сервере и формирование L3-покрытия, загрузку L3-покрытия на шину данных. При этом в рамках программной платформы обеспечивается регламентированное формирование L3-мозаик KMCC КА «Метеор-М» с использованием подхода [30]. С учетом подготовки к предоставлению L3-покрытия продукт предоставляется потребителям с задержкой не более суток;
- 4) L3-процесс распространения – включает выгрузку покрытия из шины данных на сервер, обработку L3-покрытия в части подготовки к предоставлению (COG-формат), загрузку обработанных данных на сервер распространения. Специфика технологий предоставления потребителям мозаичных покрытий KMCC КА «Метеор-М» рассматривается в [31];
- 5) Процесс архивирования – включает загрузку всех сформированных продуктов шины данных в долговременный архив. Ограниченный объем шины данных для хранения L1 и L3-продуктов обуславливает применение многоуровневых систем хранения данных, что приводит к дополнительным технологическим процессам загрузки и выгрузки информационных продуктов в долговременный архив (на средствах ленточной библиотеки). При этом для снимков, выполненных на временном интервале не более года относительно текущей даты, обеспечивается кэширование в шине данных. Таким образом, обращение к продуктам архива предусматривается, только при необходимости формирования L2-продуктов, по данным прошлой годней съемки. Далее ТП обработки данных и формирования информационных продуктов рассматриваются без учета данных операций работы с архивом.

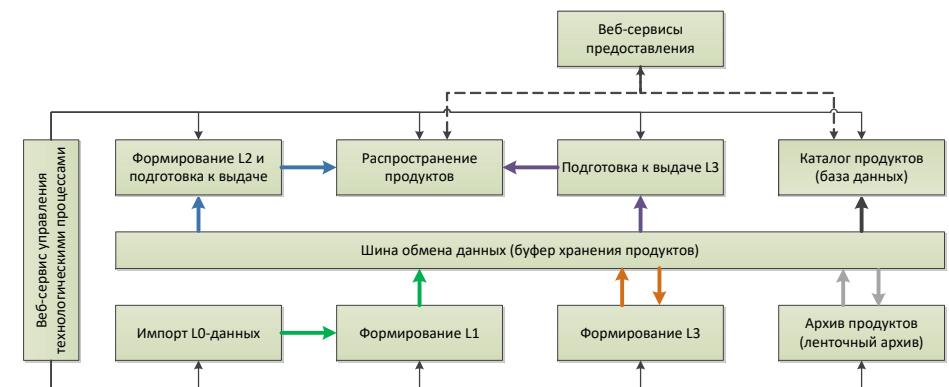


Рис. 4. Архитектура программной платформы формирования и предоставления L2/L3-продуктов российских КС ДЗЗ. Жирные стрелки – направление движения растровых данных (цветом отмечены различные технологические процессы: L1-процесс – зеленый; L2-процесс – синий; L3-процесс распространения – фиолетовый; процесс архивирования – серый). Пунктирные стрелки – веб-интерфейсы доступа к сформированным продуктам.

Fig. 4. Architecture of the software platform for generating and delivering L2/L3 products for Russian remote sensing systems. Bold arrows indicate the direction of raster data flow (colors indicate different technological processes: L1 process – green; L2 process – blue; L3 distribution process – purple; archiving process – gray). Dashed arrows indicate web interfaces for accessing generated products.

С целью обеспечения (15) рассмотрим условия, при которых нижняя граница производительности ТП формирования информационных продуктов удовлетворяет заданным требованиям. С учетом приведенных особенностей технологических процессов КМСС КА «Метеор-М» перепишем (15) на основе (8) следующим образом

$$\left\{ \begin{aligned} &\left(\frac{1}{\omega_{in}} + \frac{1}{\omega_1} + \frac{k_1}{\omega_T} \right)^{-1} > [\Omega_1] \\ &\left(\frac{1}{\omega_T} + \frac{1}{\omega_2} + \frac{k_2}{\omega_{out}} \right)^{-1} > [\Omega_2] \\ &\left(\frac{1+2 \cdot k_3}{\omega_T} + \frac{1}{\omega_3} + \frac{k_3}{\omega_4} + \frac{k_3 \cdot k_4}{\omega_{out}} \right)^{-1} > [\Omega_3] \end{aligned} \right. \quad (19)$$

где
 ω_{in} – производительность операции загрузки продуктов L0-данных на сервер обработки;
 ω_T – производительность загрузки/выгрузки на шину данных;
 ω_{out} – производительность загрузки продуктов на сервер распространения;
 $\{\omega_1, k_1\}$ – производительность и продуктивность операции формирования L1-продуктов;
 $\{\omega_2, k_2\}$ – производительность и продуктивность операции формирования L2-продуктов, включая подготовку к предоставлению;
 $\{\omega_3, k_3\}$ – производительность и продуктивность операции формирования L3-мозаики;
 $\{\omega_4, k_4\}$ – производительность и продуктивность операции подготовки к распространению L3-продуктов.
 $[\Omega_1]$ – минимально-допустимая производительность L1-процесса, при которой не происходит переполнение входного буфера;
 $[\Omega_2]$ – минимально-допустимая производительность L2-процесса, при котором среднесуточное время формирование L2-продуктов для заказанных потребителями сцен составляет не более суток;
 $[\Omega_3]$ – минимально-допустимая производительность L3-процесса, при котором обеспечивается формирование и предоставление L3-мозаики не более суток.

Далее рассматриваются результаты моделирования производительности технологических процессов, а также эффективности программной платформы относительно номинальных показателей. В табл. 3 приведены значения параметров, используемых при расчетах. В частности, производительность рассматриваемых операций обработки данных и формирования информационных продуктов ДЗЗ исследуется в диапазоне 25-175% относительно номинальных значений. Коэффициенты продуктивности рассчитаны на основе предельных соотношений формируемых продуктов к размерам исходных данных. Минимально-допустимая производительность рассчитана с учетом приведенных реальных требований к программной платформе. Характеристики производительности операций импорта и загрузки на сервер распространения приведены в диапазоне 50-200% относительно номинальных характеристик. Производительность шины данных рассматривается в качестве параметра моделирования эффективности, учитывая данный элемент программной платформы критическим.

На рис. 5-7 показаны результаты моделирования относительной производительности $\varepsilon_q = (\Omega_q - [\Omega_q]) / [\Omega_q]$ отдельных технологических процессов в зависимости от производительности шины данных ω_T . Отрицательное значение ε_q соответствует невыполнимости критерия (15). Черным цветом на рисунках демонстрируются оценки, соответствующие номинальным характеристикам. Производительность буферов импорта ω_{in} и выдачи ω_{out} соответствует номинальным характеристикам.

Эффективность программной платформы формирования и предоставления информационных продуктов КМСС КА «Метеор-М» в зависимости от производительности ШД демонстрируется на рис. 8. Черным цветом показана оценка, соответствующая номинальным

характеристикам. Влияние производительности буферов импорта и выдачи на эффективность программной платформы приведено на рис. 9. На рис. 10 показаны графики эффективности, при снижении производительности отдельных операций технологических процессов.

Табл. 3. Допустимые значения параметров производительности
Table 3. Acceptable performance parameter values.

Параметр	Допустимые значения
Импорта L0-данных (ω_{in})	30-120 МБ/с
Загрузка на сервер распространения продуктов (ω_{out})	
Производительность L1-операции (ω_1)	0.25-1.75 МБ/с
Производительность L2-операции (ω_2)	4-28 МБ/с
Производительность L3-операции (ω_3)	20-140 МБ/с
Производительность операции подготовки к распространению L3-продуктов (ω_4)	5-35 МБ/с
Коэффициент продуктивности операции формирования L1-продуктов (k_1)	1
Коэффициент продуктивности операции формирования L2-продуктов (k_2)	5
Коэффициент продуктивности операции формирования L3-продуктов (k_3)	0.05
Коэффициент продуктивности операции подготовки к распространению L3-продуктов (k_4)	1
Минимально-допустимая производительность L1-процесса ($[\Omega_1]$)	0,85 МБ/с
Минимально-допустимая производительность L2-процесса ($[\Omega_2]$)	5 МБ/с
Минимально-допустимая производительность L3-процесса ($[\Omega_3]$)	30 МБ/с

Рассчитанные показатели эффективности программной платформы последовательного формирования и предоставления информационных продуктов КМСС КА «Метеор-М» позволяют сделать следующие выводы:

- 1) Номинальные характеристики обеспечивают эффективность программной платформы более 80%, при производительности ШД более 65 МБ/с. Производительность ШД более 74МБ/с – обеспечивает эффективность чуть более 90%. Дальнейшее увеличение производительности ШД не оказывает существенного влияния;
- 2) Увеличение производительности импорта данных и выдачи сформированных продуктов не существенно оказывает влияние на эффективность программной платформы. Снижение производительности – критично;
- 3) Относительная производительность последовательного L3-процесса обеспечивает выполнение минимально-допустимого требования, при производительности ШД более 65 МБ/с. При этом допускается снижение производительности L3-операции на 25%, при двукратном увеличении производительности ШД;
- 4) Для достижения эффективности близкой 100% требуется дополнительно увеличить производительность L1 и L2-процессов более 25%. При этом снижение производительности L3-процесса на 25% обеспечит эффективность, соответствующую номинальным характеристикам, при условии увеличения производительности ШД до 105МБ/с.

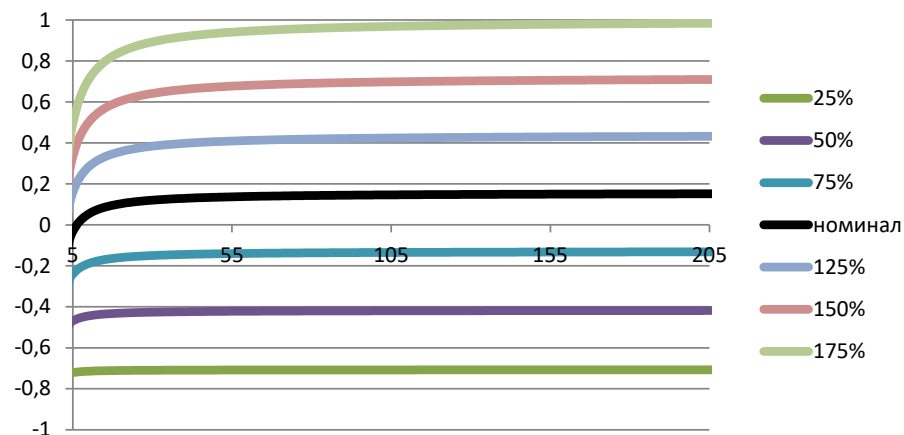


Рис. 5. Относительная производительность последовательного технологического процесса формирования L1-продуктов КМСС КА «Метеор-М» в зависимости от производительности ШД (ось абсцисс, МБ/с). Цветом отмечены графики, соответствующие уменьшению/увеличению производительности ω_1 операций относительно номинала.

Fig. 5. Relative performance of the sequential technological process for generating the L1 products for KMSS of Meteor-M satellite depending on the data bus performance (abscissa axis, MB/s). The color-coded graphs correspond to the decrease/increase in the performance of ω_1 operations relative to the nominal value.

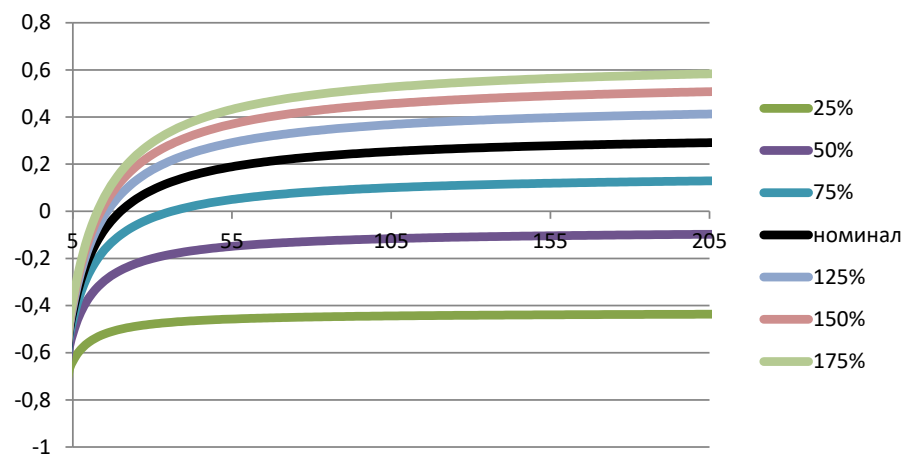


Рис. 6. Относительная производительность последовательного технологического процесса формирования и распространения L2-продуктов КМСС КА «Метеор-М» в зависимости от производительности ШД (ось абсцисс, МБ/с). Цветом отмечены графики, соответствующие уменьшению/увеличению производительности ω_2 операций относительно номинала.

Fig. 6. Relative performance of the sequential technological process for generating and distribution of L2 products for KMSS of Meteor-M satellite depending on the data bus performance (abscissa axis, MB/s). The color-coded graphs correspond to the decrease/increase in the performance of ω_2 operations relative to the nominal value.

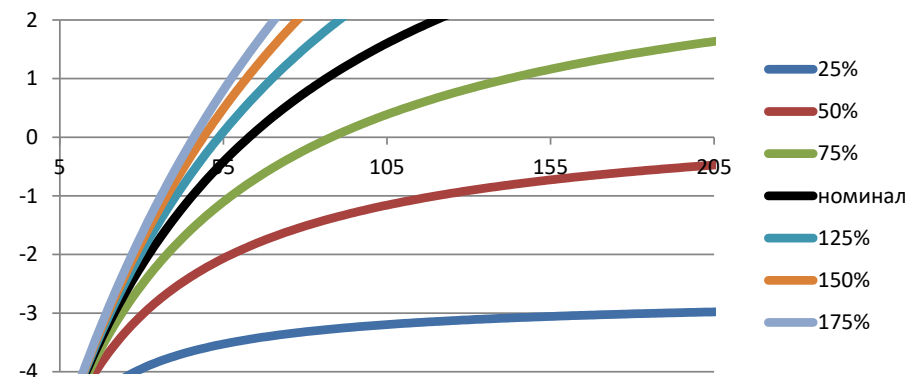


Рис. 7. Относительная производительность последовательного технологического процесса формирования и распространения L3-продуктов КМСС КА «Метеор-М» в зависимости от производительности ШД (ось абсцисс, МБ/с). Цветом отмечены графики, соответствующие уменьшению/увеличению производительности $\omega_3 - \omega_4$ операций относительно номинала.

Fig. 7. Relative performance of the sequential technological process for generating and distribution of L3 products for KMSS of Meteor-M satellite depending on the data bus performance (abscissa axis, MB/s). The color-coded graphs correspond to the decrease/increase in the performance of $\omega_3 - \omega_4$ operations relative to the nominal value.

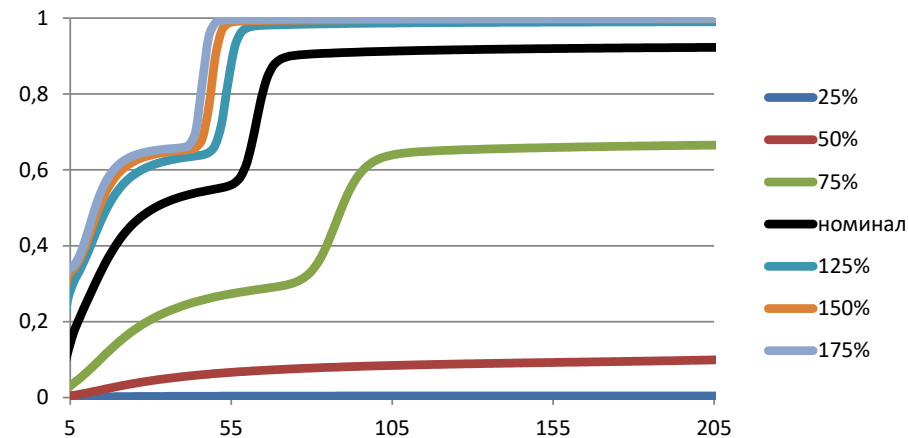


Рис. 8. Эффективность программной платформы последовательного формирования и предоставления информационных продуктов КМСС КА «Метеор-М» в зависимости от производительности ШД (ось абсцисс, МБ/с). Цветом отмечены графики, соответствующие уменьшению/увеличению производительности $\omega_1 - \omega_4$ операций относительно номинала.

Fig. 8. The efficiency of the software platform for the sequential formation and distribution of information products of the Meteor-M satellite depending on the data bus performance (abscissa axis, MB/s). The color-coded graphs correspond to the decrease/increase in the performance of $\omega_1 - \omega_4$ operations relative to the nominal value.

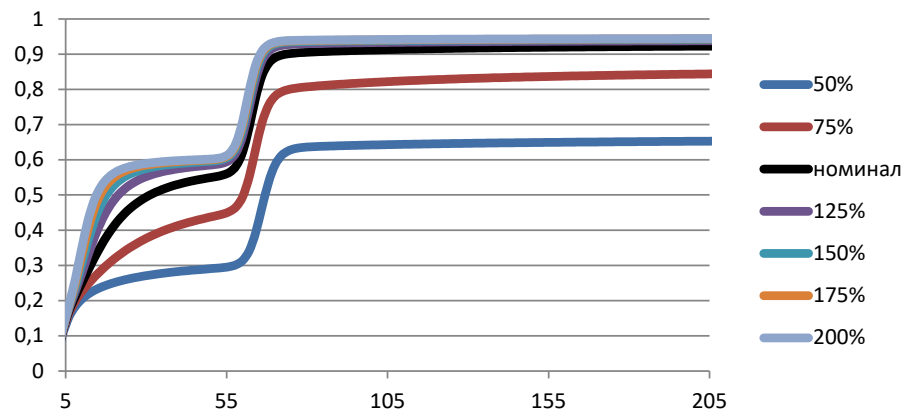


Рис. 9. Эффективность программной платформы последовательного формирования и предоставления информационных продуктов КМСС КА «Метеор-М» в зависимости от производительности ШД (ось абсцисс, МБ/с). Цветом отмечены графики, соответствующие уменьшению/увеличению производительности ω_{in} , ω_{out} операций относительно номинала.

Fig. 9. The efficiency of the software platform for the sequential formation and distribution of information products of the Meteor-M satellite depending on the data bus performance (abscissa axis, MB/s). The color-coded graphs correspond to the decrease/increase in the performance of ω_{in} , ω_{out} operations relative to the nominal value.

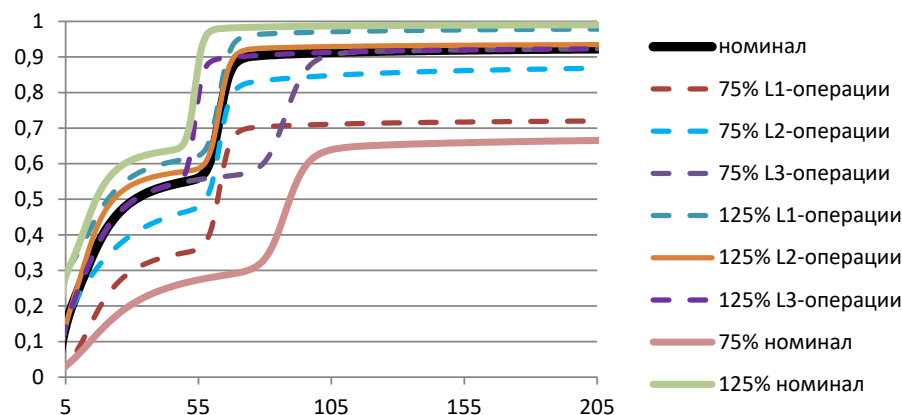


Рис. 10. Эффективность программной платформы последовательного формирования и предоставления информационных продуктов КМСС КА «Метеор-М» в зависимости от производительности ШД (ось абсцисс, МБ/с). Пунктиром отмечены графики, соответствующие уменьшению/увеличению производительности для отдельных операций относительно номинала. Сплошные линии соответствуют уменьшению/увеличению производительности $\omega_1 - \omega_4$ операций относительно номинала.

Fig. 10. The efficiency of the software platform for the sequential formation and distribution of information products of the Meteor-M satellite depending on the data bus performance (abscissa axis, MB/s). The dotted lines indicate the graphs corresponding to the decrease/increase in productivity for individual operations relative to the nominal value. The solid lines correspond to the decrease/increase in productivity for $\omega_1 - \omega_4$ operations relative to the nominal value.

6. Заключение

В настоящей работе рассмотрена проблема оценки производительности технологий последовательной и конвейерной обработки данных ДЗЗ, а также эффективности информационных систем, задействующих такого рода технологические процессы. Предложены аналитические модели для расчёта оценок.

На основе предложенного подхода к оценке эффективности информационных систем ДЗЗ выполнен анализ программной платформы формирования высокоуровневых информационных продуктов ДЗЗ. Для этого построена аналитическая модель технологических процессов и проведено моделирование с учетом номинальных характеристик. По результатам численного эксперимента, во-первых, подтверждена эффективность данной платформы – более 90%. Во-вторых, определены условия для повышения эффективности до 98%. В-третьих, отмечается возможность перераспределения вычислительных ресурсов в части уменьшения производительности отдельных операций, при увеличении производительности шины данных. Полученные оценки определяют нижнюю границу эффективности рассмотренной программной платформы. Соответственно, применение конвейерной обработки для технологических процессов позволит повысить эффективность данной платформы. В свою очередь, с использованием предложенного в настоящей работе подхода рассчитываются предельно допустимые оценки эффективности.

Таким образом, предложенный теоретический аппарат оценки эффективности информационных систем ДЗЗ позволяет моделировать условия, при которых можно исследовать эффективность действующих и новых разрабатываемых систем потоковой обработки и формирования информационных продуктов ДЗЗ, в том числе с учетом изменения вычислительной инфраструктуры и/или производительности технологических процессов. При этом дальнейшее развитие рассмотренного подхода целесообразно проводить с учетом расширения стратегий обработки данных (например, Map-reduce или контейнеризация), реализуемых в рамках информационных систем. Кроме того, целесообразно дополнительное проведение вычислительных экспериментов для верификации теоретических оценок.

Список литературы / References

- [1]. Moderate resolution imaging spectroradiometer MODIS. Available at: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>, accessed 12.06.2026.
- [2]. Sentinel Hub by Planet Labs. Available at: <https://www.sentinel-hub.com/>, accessed 12.06.2026.
- [3]. A registry of publicly available datasets on AWS. Available at: <https://github.com/aws-labs/open-data-registry>, accessed 12.06.2026.
- [4]. Planet Labs. Planet Insights Platform. Available at: <https://www.planet.com/products/planet-insights-platform/>, accessed 12.06.2026.
- [5]. Planet Labs. Planet Documentation. Delivery Schema. Available at: <https://docs.planet.com/develop/apis/subscriptions/delivery/>, accessed 12.06.2026.
- [6]. Лупян Е.А., Бурцев М.А., Прошин А.А., Кобец Д.А. Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2018, т. 15, № 3, с. 53-66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
- [7]. Роскосмос. Банк базовых продуктов межведомственного использования. Доступно по ссылке: <https://bbp.ntsomz.ru/>, обращение 12.06.2026.
- [8]. Цифровая Земля. Сервисы. Доступно по ссылке: <https://dgeth.ru/services/>, обращение 12.06.2026.
- [9]. ВЕГА-PRO. Спутниковый сервис анализа вегетации. Доступно по ссылке: <http://pro-vega.ru/>, обращение 12.06.2026.
- [10]. Лупян Е.А., Балашов И.В., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Пырклов В.Н., Радченко М.В., Толпин В.А., Уваров И.А. Методы и технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга (Опыт развития и использования).

- Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2022, с. 7. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a.
- [11]. ИКИ. Сверхбольшие архивы спутниковых данных и возможности их распределенного анализа. ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Доступно по ссылке: <http://ckp.geosmis.ru/>, обращение 12.06.2026.
 - [12]. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Баргалева С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг»). Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019, т. 16, № 3, с. 151-170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
 - [13]. EOSDIS Handbook. National Aeronautics and Space Administration, 2017, March, p. 51. Available at: https://cdm.earthdata.nasa.gov/conduit/upload/6321/EOSDIS_Handbook_1.3.pdf. Accessed 12.06.2026.
 - [14]. Plato E. A. Highlighting Recent Uses of the NASA Worldview Mapping Application / Goddard Space Flight Center. — 2020. — Report No. GSFC-E-DAA-TN76137-1. — NASA Technical Reports Server (NTRS). Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20200000554>, accessed 12.06.2026.
 - [15]. Марков А.Н., Васильев А.И., Ольшевский Н.А., Коршунов А.П., Михаленков Р.А., Салимонов Б.Б., Стрёмов А.С. Архитектура геоинформационного сервиса «Банк базовых продуктов». Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, М., 2016, т. 13, № 5, с. 39-51. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-39-51.
 - [16]. Марков А.Н., Васильев А.И., Ольшевский Н.А., Крылов А.В., Салимонов Б.Б., Синяев П.А., Михаленков Р.А., Волкова Е.В. Технологии ведения банка базовых продуктов ДЗЗ для задач цифровой экономики РФ. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020, т. 17, № 5, с. 79-90. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-79-90.
 - [17]. 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. Доступно по ссылке: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2012t5/45-54.pdf, обращение 12.06.2026.
 - [18]. Недолужко И.В., Бабяк П.В., Тарасов Г.В., Ерёмченко В.С. Инфраструктура приёма, распределённой обработки и поставки спутниковых данных Центре коллективного пользования Регионального спутникового мониторинга ДВО РАН. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012, т. 9, № 3, с. 324-331. Доступно по ссылке: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2012t3/324-331.pdf, обращение 12.06.2026.
 - [19]. Xu C., Du X., Fan X., Giuliani G., Hu Z., Wang W., Liu J., Wang T., Yan Z., Zhu J., Jiang T., Guo H. Cloud-based storage and computing for remote sensing big data: a technical review. *International Journal of Digital Earth*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 1417-1445. DOI: 10.1080/17538947.2022.2115567.
 - [20]. Cloud Optimized GeoTIFF. Available at: <https://cogeo.org/>. Accessed 12.06.2026.
 - [21]. Luttgau J., Kuhn M., Duwe K., Alforov Y., Betke E., Kunkel J., Ludwig T. Survey of storage systems for high-performance computing. *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 2018, vol. 5, no. 1. DOI: 10.14529/jsfi180103.
 - [22]. Скрипкин К.Г. Экономическая эффективность информационных систем. М.: ДМК-Пресс, 2002, 256 с.
 - [23]. Черепанов А.С. Вегетационные индексы. *Геоматика*, 2011, № 2, с. 98-102. Доступно по ссылке: https://sovzond.ru/upload/iblock/f46/2011_02_017.pdf, обращение 12.06.2026.
 - [24]. Index DataBase. A database for remote sensing indices. List of available Indices. Available at: <https://www.indexdatabase.de/db/i.php>, accessed 12.06.2026.
 - [25]. Полянский И. В. Комплекс многозональной спутниковой съёмки на КА «Метеор-М»: особенности съёмочной аппаратуры, получения и предварительной обработки данных. Институт космических исследований РАН, 2015. Доступно по ссылке: <http://smiswww.iki.rssi.ru/school/files/presentation/2015/school/polyanskyi.pdf>. Обращение 12.06.2026.
 - [26]. Полянский И.В., Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Прохорова С.А., Сметанин П.С. Комплекс многозональной спутниковой съёмки среднего разрешения для гидрометеорологических космических аппаратов. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019, т. 16, № 6, с. 83-92. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92.
 - [27]. Бекренёв О.В., Жуков Б.С., Гришанцева Л.А., Полянский И.В. Особенности автоматической потоковой обработки данных КМСС космического комплекса «Метеор-3М». *Геоматика*, 2015,

- № 2, с. 32-36. Доступно по ссылке: https://sovzond.ru/upload/iblock/598/5_32-36.pdf, обращение 12.06.2026.
- [28]. Васильев А.И. Разработка методов автоматического контроля точности геопроецирования данных КМСС КА «Метеор-М» № 2. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2023, т. 10, вып. 1, с. 31-41. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2022.10.1.31.41.
- [29]. Марков А.Н., Васильев А.И., Степанова Д.В., Евлашкин М.А., Крылов А.В., Салимонов Б.Б. Технологические и программные модели формирования базовых продуктов ДЗЗ. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 3, с. 29-38. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.29.38.
- [30]. Васильев А.И., Крылов А.В., Пестряков А.А., Скачков А.М. Алгоритмы потоковой обработки данных КМСС КА Метеор-М в обеспечение автоматического формирования сплошного покрытия территории РФ. Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2021, с. 13. DOI 10.21046/19DZZconf-2021a.
- [31]. Васильев А.И., Ольшевский Н.А., Синяев П.А., Пестряков А.А. Особенности технологий онлайн предоставления мозаичных сплошных покрытий российских КА ДЗЗ. *Информация и Космос*, 2024, № 2, с. 132-140. Доступно по ссылке: <https://www.infokosmo.ru/file/article/17260.pdf>, обращение 12.06.2026.

Информация об авторах / Information about authors

Антон Игоревич ВАСИЛЬЕВ – кандидат физико-математических наук, начальник сектора разработки приложений и геоинформационных сервисов Научного центра оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы». Сфера научных интересов: методы обработки изображений, компьютерное зрение, фотограмметрия, технологии обработки данных ДЗЗ, создание геоинформационных систем и сервисов.

Anton Igorevich VASILIEV – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of sector for the Application and Geoinformation Services Development at the Scientific Center for Operational Monitoring of the Earth JSC "Russian space systems". Research interests: image processing methods, computer vision, photogrammetry, remote sensing data processing technologies, and the development of geoinformation systems and services.

Сергей Михайлович СОКОЛОВ является главным научным сотрудником Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, доктор физико-математических наук, профессор. Его научные интересы включают распознавание образов, обработка изображений, создание систем технического зрения и мобильных роботов и др.

Sergey Mikhailovich SOKOLOV – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., a chief researcher at the Keldysh Institute of Applied Mathematics of the RAS. His research interests include pattern recognition, image processing, the development of machine vision systems and mobile robots and other areas.