

В.А. ЗЕЛЕНЦОВ, И.Ю. ПИМАНОВ, С.А. ПОТРЯСАЕВ  
**ИНТЕГРАЦИЯ РАЗНОРОДНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
РЕСУРСОВ И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ МОНИТОРИНГЕ И  
УПРАВЛЕНИИ РАЗВИТИЕМ ТЕРРИТОРИЙ**

*Зеленцов В.А., Пиманов И.Ю., Потрясаев С.А. Интеграция разнородных информационных ресурсов и данных дистанционного зондирования Земли при мониторинге и управлении развитием территорий.*

**Аннотация.** Статья посвящена разработке модельно-алгоритмического обеспечения и программных средств для автоматизации процессов интеграции данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и других разнородных информационных ресурсов при решении задач мониторинга и проактивного управления развитием территорий. Отличительной особенностью постановки задачи является включение в состав интегрируемых ресурсов средств моделирования состояния природно-технических объектов, расположенных на анализируемой территории. Основу разработки составляет обоснование технологии интеграции разнородных информационных ресурсов, включающей алгоритм выбора типа архитектуры создаваемого комплекса средств автоматизации, способ описания информационного процесса интеграции данных и их совместной обработки, алгоритм определения наилучшей конфигурации информационных ресурсов при решении тематических задач, а также совокупность программно-технологических решений по интеграции данных ДЗЗ с другими необходимыми данными и их совместному использованию при моделировании. В результате исследований и применения разработанных алгоритмов установлено, что наиболее предпочтительным типом архитектуры систем интеграции разнородных информационных ресурсов является сервис-ориентированная архитектура. Для описания информационного процесса интеграции предложено использование нотации Business Process Model and Notation. Ключевым компонентом разработки в части программно-технологических решений по интеграции разнородных данных является предложенная схема взаимодействия с поставщиками и потребителями данных на основе создания слоя абстракции данных. Применение предложенного решения позволяет привести разнородные данные к единому универсальному формату для последующей совместной обработки на средствах моделирования. Проведенная апробация на конкретных тематических задачах мониторинга и управления развитием территорий показала реализуемость предложенной технологии интеграции и разработанных программно-технологических средств, а также достижение существенного выигрыша в оперативности решения тематических задач.

**Ключевые слова:** автоматизация, проактивное управление, информационные ресурсы, данные дистанционного зондирования Земли, интеграция данных, комплексное моделирование, сервис-ориентированная архитектура, многокритериальная оптимизация.

**1. Введение.** В настоящее время при решении задач мониторинга и управления развитием территорий все более широкое применение находят данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), получаемые с различных отечественных и зарубежных космических аппаратов (КА). Как в нашей стране, так и за рубежом

развиваются системы доступа к данным ДЗЗ, создаются новые тематические сервисы. Среди российских разработок можно выделить геопортал Роскосмоса [1], информационную систему дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства России [2], информационные ресурсы ГИС «Каскад» и ГИС «Космоплан» системы космического мониторинга чрезвычайных ситуаций МЧС России [3], геопортал «Вега» Института космических исследований РАН [4], геопортал «Цифровая Земля» [5], тематические порталы на базе ресурсов ряда коммерческих компаний [6 – 8], и другие.

Необходимо отметить, что в статье не рассматриваются такие специальные области интегрированного применения данных космического мониторинга, как моделирование состояния окружающей среды, климата, прогноза погоды, и ряд других, отличающихся глобальным характером наблюдаемых процессов и моделей их описания. Здесь рассматривается класс задач управления развитием территорий локального и регионального масштабов, требующих детального анализа и прогнозирования состояния расположенных на этих территориях различных природно-технических объектов (ПТО). Примерами ПТО являются системы гидроэнергетики, зоны разработки полезных ископаемых, лесные и сельскохозяйственные объекты, и др. К числу наиболее характерных примеров относятся региональные водные объекты и территории распространения наводнений с расположенной на них инфраструктурой.

Несмотря на постоянное совершенствование перечисленных выше систем доступа к данным ДЗЗ и создание большого количества тематических сервисов [9 – 11] для решения рассматриваемых задач, вопросы оперативного доведения пользователям требуемых данных и информации на их основе в значительной степени остаются открытыми. По-прежнему актуальными являются задачи упрощения взаимодействия пользователей-непрограммистов с создаваемыми системами и сокращения длительности обработки разнородных данных для систем мониторинга и управления развитием территорий, что напрямую диктует необходимость дальнейшего повышения уровня автоматизации обработки и подготовки данных и информации для решения задач управления.

К ключевым проблемам в рассматриваемой области управления развитием территорий также относятся ограниченные возможности существующих систем по интеграции данных, получаемых с разнотипных КА ДЗЗ, а также ограничения по совместному использованию данных ДЗЗ с другими информационными ресурсами, необходимыми для решения управленческих задач. Вместе с тем,

очевидно, что обработка данных ДЗЗ и поставка их потребителю не являются конечными целями в задачах управления. Главным является качественная информационная поддержка выработки потребителями своевременных и обоснованных решений по управлению развитием территорий, в том числе по действиям в чрезвычайных ситуациях, по планированию природопользованием, и т.д. Решение таких задач требует использования дополнительной информации об анализируемых объектах и территориях – например, результатов наземных измерений, кадастровых и других пространственных и непространственных данных.

Отметим, что понятие «информационный ресурс» рассматривается здесь в широком смысле как совокупность данных, организованных для эффективного получения достоверной информации [12] – в нашем случае, информации, необходимой для анализа, моделирования и прогнозирования развития территорий. К информационным ресурсам будем относить, в том числе, электронные базы данных, содержащие информацию о текущих и прогнозных значениях параметров среды и наблюдаемых объектов, интернет-ресурсы с необходимой для моделирования информацией, и т.д. В таком контексте термины интеграция данных и интеграция информационных ресурсов будут рассматриваться как синонимы.

Важнейшим компонентом информационного обеспечения управления являются также результаты моделирования развивающихся ситуаций и изменения состояния природно-технических объектов на анализируемых территориях. Эта составляющая информационного обеспечения особенно важна для осуществления *проактивного* управления [13, 14] развитием территорий, которое основано на моделировании и прогнозировании изменения состояния ПТО и в целом развивающихся ситуаций на анализируемых территориях.

В настоящее время для различных предметных областей достаточно активно разрабатываются приложения, предполагающие совместное использование данных ДЗЗ и дополнительных данных о территориях [15 – 17]. При этом разработки, нацеленные на совместное использование разнородных данных, включая данные ДЗЗ, и результатов моделирования ПТО, а также автоматизацию этих процессов, находятся лишь в начальной стадии. Как следствие, существующие системы, в основном, предназначены для анализа ситуаций «по фактам» уже случившихся событий и не направлены на их прогнозирование и предупреждение.

При включении средств моделирования в состав интегрируемых ресурсов важно учитывать тот факт, что для адекватного описания ПТО

и высокой достоверности прогнозов требуется применение, как правило, не одной, а семейства моделей или полимодельных комплексов (ПМК) [18, 19]. Каждая из моделей может являться наилучшей в определенном диапазоне внешних условий и/или диапазоне свойств ПТО. Причем эти условия и свойства ПТО могут динамически изменяться во времени. Перспективным направлением обеспечения высокого качества прогнозов на длительном интервале времени или в широком диапазоне свойств ПТО являются параметрическая и структурная адаптация моделей, а также переход от модели к модели (от ПМК к ПМК) в процессе функционирования соответствующих систем информационного обеспечения проактивного управления [19]. Это означает, что автоматизация совместного использования разнородных информационных ресурсов и результатов моделирования требует создания инструментов адаптации и выбора моделей описания ПТО на анализируемых территориях, а также перехода от одной модели к другой в процессе функционирования создаваемых программных комплексов обработки данных. Например, для прогнозирования зон затоплений при речных наводнениях могут использоваться результаты расчетов от нескольких типов гидрологических и гидродинамических моделей, моделей на основе искусственных нейронных сетей, и др. [20 – 23]. В зависимости от внешних факторов и рассматриваемого участка русла реки состав моделей, привлекаемых для расчетов, должен меняться для обеспечения максимальной достоверности прогнозов. Причем сами модели, как правило, принадлежат различным разработчикам и реализованы в виде программных модулей на территориально распределенных вычислительных ресурсах.

Обоснование технологии комплексного применения необходимого модельно-алгоритмического обеспечения и программных средств для сквозной автоматизации процессов интеграции данных ДЗЗ, других разнородных информационных ресурсов и средств моделирования в подобных сложных задачах является целью исследования, результаты которого представлены в данной работе. Основной акцент сделан на формирование автоматически реализующихся процессов полного цикла – от получения необходимых данных ДЗЗ с различных КА, а также других видов данных, до предоставления пользователю конечного результата в виде тематического продукта<sup>1</sup> или сервиса. Ряд частных результатов

---

<sup>1</sup> Тематический продукт обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса: Продукт, созданный на основе дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли из космоса, с применением тематической или аналитической обработки, в том числе с использованием пространственных данных и других видов информации, для решения задач потребителей [24].

по данному направлению исследований представлен в предыдущих публикациях авторов [25 – 27]. В данной статье выполнено обобщение и развитие этих результатов применительно к решению проблемы автоматизации процессов интеграции разнородных информационных ресурсов в целом.

**2. Технология интеграции разнородных информационных ресурсов.** Перспективным направлением решения рассматриваемой проблемы автоматизации процессов интеграции данных ДЗЗ, других разнородных данных и результатов моделирования является использование и развитие концепции комплексной автоматизации и интеллектуализации задач получения, обработки, анализа и практического использования разнородных данных, поступающих из различных источников [28]. При этом требуемый уровень автоматизации может быть обеспечен путем разработки соответствующей технологии интеграции разнородных информационных ресурсов (ИРИР), в том числе данных ДЗЗ, предполагающей автоматический выбор источников данных в ходе решения каждой конкретной тематической задачи мониторинга и(или) проактивного управления, извлечение требуемых исходных данных из различных источников, их интеграцию и совместную обработку в моделирующих комплексах, опубликование и визуализацию.

Технология ИРИР по своему содержанию относится к информационным технологиям и может быть определена как совокупность алгоритмов и программно-технологических средств, обеспечивающих автоматизацию процессов сбора, интеграции, совместной обработки, хранения разнородных данных о состоянии объектов и территорий, представления и распространения результатов обработки. Соответственно, технология ИРИР включает в свой состав комплекс средств автоматизации (т.е. определенный набор взаимодействующих программных модулей, скомпонованных на базе выбранной архитектуры), а также модели и алгоритмы их совместного функционирования. Это означает, что создание технологии ИРИР должно предусматривать: 1) разработку модельно-алгоритмического обеспечения интеграции разнородных информационных ресурсов; 2) определение состава необходимых программно-технологических средств для решения задач ИРИР при мониторинге и управлении развитием территорий; 3) разработку комплекса средств для автоматизации процессов интеграции и совместной обработки данных, полученных от различных КА ДЗЗ, а также данных из других источников.

Отметим, что в дальнейшем изложении будут различаться понятия комплекса средств автоматизации (КСА) и системы ИРИР в целом. В отличие от КСА, система интеграции включает также информационные ресурсы и средства моделирования, которые являются внешними системами по отношению к КСА и привлекаются в ходе решения конкретной тематической задачи в качестве источников и потребителей разнородных данных. В этом смысле КСА представляет собой универсальное ядро для систем ИРИР, различающихся составом привлекаемых внешних информационных ресурсов и средств моделирования.

С точки зрения разработки модельно-алгоритмического обеспечения могут быть выделены две основные особенности технологии ИРИР. Первая из них состоит в том, что, как уже отмечалось, для осуществления *проактивного* управления развитием территорий в состав интегрируемых ресурсов входят модули (сервисы), осуществляющие моделирование анализируемых ПТО с целью предсказания их состояния в будущие моменты времени. Другой принципиальной особенностью технологии ИРИР является обеспечение возможности использования для описания ПТО не одной, а нескольких моделей (полимодельных комплексов) с реализацией процедуры выбора наилучших моделей (полимодельных комплексов) для каждого этапа функционирования КСА и системы интеграции в целом. На практике процесс выбора моделей заключается в определении состава программных модулей прогнозирования состояния ПТО, включаемых в контур решения тематических задач.

При учете описанных особенностей обобщённая схема технологии интеграции разнородных информационных ресурсов может быть представлена в виде, приведенном на рисунке 1. На данном рисунке в левой части показаны интегрируемые информационные ресурсы, в центре цветом выделены технологические операции ИРИР. В овалах представлены компоненты алгоритмического и программно-технологического обеспечения операций ИРИР.

В соответствии с приведенной на рисунке схемой технология ИРИР включает решение двух типов задач интеграции:

1 – определение состава модулей и информационных ресурсов для решения каждой конкретной тематической задачи, в том числе модулей (сервисов) моделирования ПТО, из доступных альтернативных вариантов;

2 – интеграцию разнородных данных, поступающих из различных источников (информационных ресурсов), в том числе от

разных КА ДЗЗ, для их совместного использования при моделировании и решении тематических задач мониторинга и проактивного управления развитием территорий.

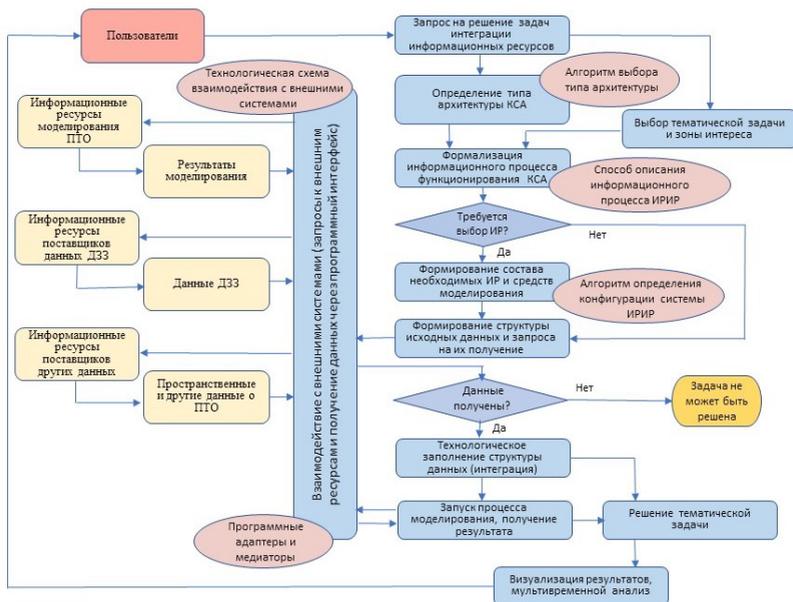


Рис. 1. Обобщённая схема технологии ИРИР (здесь ИР – информационные ресурсы)

В результате решения задачи 1 определяются тип архитектуры КСА, а также для каждой тематической задачи – состав средств моделирования, необходимых им исходных данных, и, соответственно, состав привлекаемых информационных ресурсов. То есть определяется конфигурация системы ИРИР в целом. Далее, на основе привлекаемых и разрабатываемых программно-технологических средств решаются задачи 2 типа по интеграции данных ДЗЗ и других данных для выбранной конфигурации. Совместно результаты решения задач 1 и 2 типов определяют структуру и порядок функционирования КСА и системы ИРИР в целом при решении заданных тематических задач.

**3. Модельно-алгоритмическое обеспечение технологии ИРИР.** Решение задач 1 типа производится на основе применения и (или) разработки совокупности моделей и алгоритмов, к которым относятся показанные на рисунке 1:

- алгоритм выбора архитектуры КСА;
- способ описания информационного процесса ИРИР для его визуального отображения и последующей алгоритмизации задач выбора состава интегрируемых информационных ресурсов и средств моделирования;
- алгоритм выбора состава средств моделирования и необходимых информационных ресурсов.

Задачи выбора, для решения которых предназначены алгоритмы из данного перечня, являются, как правило, дискретными и многокритериальными. Конкретная реализация алгоритмов, в общем случае, зависит от типа постановки задач управления развитием территорий. Подробно возможные методы решения задач многокритериального выбора в различных постановках рассмотрены, например, в [19]. Ниже в данной работе кратко описывается применение разработанных алгоритмов для достаточно широкого круга задач интеграции ИРИР в статической постановке.

**3.1. Алгоритм выбора типа архитектуры КСА.** Выбор типа архитектуры КСА при формировании технологии ИРИР, как показано в [27], может быть основан на оценивании различных применимых архитектур по совокупности показателей качества и последующем решении задачи многокритериального выбора. К наиболее распространенным типам архитектуры, в принципе пригодным для создания КСА процессов интеграции разнородных информационных ресурсов, относятся:

- монолитная архитектура (*mon*);
- модульная архитектура (*mod*);
- компонентная архитектура (*com*);
- клиент-серверная архитектура (*csa*);
- сервис-ориентированная архитектура (*soa*).

Основными показателями качества архитектур при проведении сравнения являются: показатель оперативности, показатель модульности, показатель допустимой гетерогенности, показатель многопользовательского режима, показатель масштабируемости. Множество сравниваемых архитектур оценивается набором значений вышеперечисленных показателей, каждый из которых представляет собой лингвистическую переменную.

Алгоритм выбора базируется на научно-методическом аппарате, предполагающем совместное использование методов экспертного опроса, вербального анализа решений и методов преобразования качественных показателей в количественные, теории нечетких

множеств, отношений и мер, а также теории планирования эксперимента. Он включает следующие основные этапы:

1. Конструирование лингвистических шкал для частных показателей, перевод их значений в интервал  $[-1, +1]$ .

2. Проведение экспертного опроса на основе построенного ортогонального плана для выявления влияния частных показателей на результирующий показатель качества архитектур.

3. Формирование и расчет значений результирующего показателя качества  $F$ .

В результате реализации процедуры многокритериального оценивания в соответствии с разработанным алгоритмом получены следующие значения результирующего показателя качества:  $F_{mon}=0,711$ ;  $F_{mod}=0,754$ ,  $F_{com}=0,813$ ,  $F_{csa}=0,891$ ,  $F_{soa}=0,931$ . Таким образом, наилучшее значение результирующего показателя качества достигается при использовании СОА, что позволяет сделать обоснованный выбор в пользу ее использования для реализации технологии ИРИР.

Сервис-ориентированная архитектура реализует модульный подход к разработке программного обеспечения, основанный на использовании распределённых, слабо связанных заменяемых компонентов, оснащённых стандартизированными интерфейсами для взаимодействия по стандартизированным протоколам [29, 30]. При использовании СОА для реализации технологии ИРИР каждый из информационных ресурсов, либо модулей прогнозирования состояния ПТО, участвующих в процессе обработки разнородных данных, может оставаться на своем месте локализации, без физического перемещения на рабочее место пользователя при решении конкретной тематической задачи. Тем самым решается проблема необходимости отчуждения универсального ПО, разработанного для моделирования ПТО, от разработчика, что значительно упрощает построение систем интеграции ИРИР.

**3.2. Способ описания информационного процесса интеграции разнородных информационных ресурсов.** Применение СОА определяет правила взаимодействия разнородных информационных ресурсов и средств моделирования. При этом вопросы организации самого информационного процесса обработки данных и определения состава необходимых средств обработки требуют отдельного рассмотрения.

Функционирование систем, разрабатываемых для интеграции разнородных информационных ресурсов, как следует из рисунка 1, заключается в реализации информационного процесса, состоящего из

упорядоченных операций получения, обработки, хранения и передачи данных и информации. Для автоматизации процессов интеграции разнородных информационных ресурсов необходима разработка способа формального описания реализуемого информационного процесса с включением в него всех функционально необходимых операций (действий) по обработке данных, и с описанием связей между ними. Наличие такого описания позволит в явном виде отобразить функциональную конфигурацию систем интеграции, перейти к количественной оценке различных конфигураций, выбору наилучших конфигураций, и к разработке программных средств автоматизации процессов интеграции.

При формальном описании должен быть отражен тот факт, что каждое из действий по обработке данных может в общем случае быть реализовано различными способами, с привлечением различных ресурсов – информационных, или осуществляющих моделирование ПТО. Построенная с учетом этого конфигурация системы интеграции является необходимым компонентом задачи выбора оптимального состава средств моделирования и информационных ресурсов, используемых для решения той или другой тематической задачи.

Среди потенциально применимых подходов для описания информационного процесса функционирования рассматриваемых систем интеграции могут быть выделены: сети Петри [31]; графоаналитические подходы [32]; стандарты IDEF (Integrated DEFinition) [33]; диаграммы UML [34]; стандарт eEPC (Extended Event Driven Process Chain) [35]; нотация BPMN (Business Process Model and Notation) [36].

Сравнительный анализ показал, что нотация BPMN, изначально предназначенная для описания диаграмм бизнес-процессов, предоставляет, по сравнению с другими подходами, расширенные возможности для формального описания взаимодействия компонентов сложных систем и модели распределенных процессов [37, 38]. Именно данные отличия BPMN в наибольшей степени соответствуют особенностям рассматриваемой технологии ИРИР. Кроме того, благодаря использованию сервис-ориентированной архитектуры и нотации BPMN становится возможным визуальное конструирование процессов функционирования КСА и системы интеграции в целом за счет применения языка исполнения бизнес-процессов (Business Process Execution Language, BPEL) [39, 40], который позволяет описать и организовать логику взаимодействия веб-сервисов, используя, в том числе, визуальный редактор.

Описание информационного процесса с использованием BPMN на примере тематической задачи прогнозирования наводнений приведено на рисунке 2. Часть из показанных на рисунке действий может быть реализована альтернативными способами, с привлечением различных средств моделирования. Например, на рисунке 2 такие операции выделены цветом. Для расчета расхода воды могут быть привлечены модули, выполняющие табличный расчет (А-1), либо статистический расчет (А-2), либо реализующие нейросетевые подходы (А-3). Примерами альтернативных подходов для расчета глубин в точках являются модели среза (Б-1), модели на основе уравнений Сен-Венана (Б-2), и нейросетевые модели (Б-3).



Рис. 2. Представление процесса решения задачи прогнозирования наводнений с использованием BPMN (АГК – автоматизированный гидрологический комплекс, УГМС – Управление гидрометеослужбы)

**3.3. Алгоритм определения состава средств моделирования и информационных ресурсов.** Определение конкретного состава средств моделирования и информационных ресурсов – источников необходимых данных, то есть выбор конфигурации системы ИРИР при решении тематических задач, относится к классу задач структурного синтеза. Она может быть решена на основе методов многокритериальной оптимизации.

Данная задача может быть формализовано описана следующим образом. Введем обозначения:

$A = \{A_i, i \in N\}, N = \{1, 2, \dots, n\}$  – множество наименований средств моделирования (СрМ) и (или) информационных ресурсов, каждое из которых может быть реализовано одним из альтернативных способов;

$B = \{B_j^i, j \in \{1, 2, \dots, m_i\}, i \in N\}$  – множество потенциально возможных вариантов реализации СрМ ( $B_j^i$  –  $j$ -й вариант реализации  $i$ -го СрМ);

$c_{ij}, i \in N, j \in \{1, 2, \dots, m_i\}$  – стоимость  $j$ -го варианта  $i$ -го СрМ;

$t_{ij}, i \in N, j \in \{1, 2, \dots, m_i\}$  – оперативность (длительность работы)  $j$ -го варианта реализации  $i$ -го СрМ;

$p_{ij}, i \in N, j \in \{1, 2, \dots, m_i\}$  – целевой показатель качества работы  $j$ -го варианта реализации  $i$ -го СрМ – обычно это показатели достоверности, точности моделирования (прогнозирования), или другие показатели, характеризующие степень удовлетворения пользователя качеством моделирования (прогнозирования состояния ПТО);

$X = \|x_{ij}\|$  – вариант конфигурации системы ИРИР, где  $x_{ij} = 1$ , если в качестве  $A_i$  используется СрМ  $B_j^i$ , и  $x_{ij} = 0$ , в противном случае. При этом  $\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = 1, \forall i \in N$ , т.к. в проектируемой конфигурации в качестве СрМ  $A_i$  может использоваться какой-то один элемент  $B_j^i$  из имеющейся номенклатуры. Данные ограничения определяют область  $\Delta$  допустимых вариантов конфигурации системы ИРИР.

В качестве целевых функций задачи, в соответствии с положениями теории эффективности сложных систем [41], целесообразно использовать три группы показателей: затраты на реализацию варианта конфигурации, оперативность, под которой понимается длительность решения требуемой тематической задачи, и целевой показатель, отражающий качество полученного решения – достоверность или точность результата.

С учетом введенных обозначений задача формирования конфигурации системы ИРИР сводится к многокритериальной задаче выбора на дискретном множестве допустимых альтернатив следующего вида:

$$\min_{X \in \Delta} C(X), \min_{X \in \Delta} T(X), \max_{X \in \Delta} P(X), \quad (1)$$

где  $C(X)$  – стоимость использования средств моделирования и информационных ресурсов в конфигурации  $X$ ;  $T(X)$  – длительность

решения тематической задачи при этой конфигурации;  $P(X)$  – целевой показатель качества работы системы ИРИР.

Система ИРИР, в общем случае, может иметь сетевую структуру, подобную, показанной на рисунке 2. В этой сети можно сформировать множество кратчайших путей успешного функционирования системы ИРИР, для каждого пути  $k = 1, 2, \dots, K$  обозначим через  $\Pi_k$  множество номеров СрМ, входящих в него. Тогда анализируемые показатели могут быть определены следующим образом:

– затраты на реализацию цикла расчетов для решения тематической задачи:

$$C(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} c_{ij} \cdot x_{ij} \quad , \quad (2)$$

– длительность расчетов:

$$T(X) = \max_{k=1, \dots, K} \sum_{i \in \Pi_k} \sum_{j=1}^{m_i} t_{ij} \cdot x_{ij} \quad , \quad (3)$$

– целевой показатель:

$$P(X) = \min_{k=1, \dots, K} \min_{i \in \Pi_k} \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij} \cdot x_{ij} \quad . \quad (4)$$

Содержательно постановка задачи выбора интерпретируется следующим образом: необходимо определить такой состав средств моделирования и информационных ресурсов для решения конкретной тематической задачи мониторинга и управления развитием территорий, при котором обеспечивается минимизация затрат на функционирование выбранной конфигурации, минимизация длительности решения тематической задачи и максимизация целевого показателя качества.

Алгоритм решения подобных задач, как правило, включает определение множества недоминируемых (Парето-оптимальных) вариантов конфигурации и нахождение на этом множестве единственного решения, выбранному критерию. Для выбора единственного решения, в частности, апробированным подходом является нахождение компромиссного варианта, при котором

достигается минимизация максимального из взвешенных относительных отклонений от оптимумов по частным показателям [42]:

$$X^k = \arg \min_{X \in \Delta} \max_{l \in L} \rho_l w_l(X), \quad (5)$$

где:  $L$  – множество частных показателей качества;  $\rho_l$  – весовые коэффициенты их относительной важности,  $\rho_l > 0, \sum_{l \in L} \rho_l = 1$ ;  $w_l(X)$  – относительные отклонения значений показателей от оптимумов,  $w_l(X) = (f_l(\bullet) - f_l^0) / (f_l^* - f_l^0)$ , где  $f_l^0$  и  $f_l^*$  – соответственно наилучшее и наихудшее значения  $l$ -го показателя. Применительно к рассматриваемой задаче (1) множество  $L$  состоит из трех показателей, и частные показатели  $f_l, l \in L$ , имеют следующую интерпретацию: показатель  $f_1$  представляет собой  $C(X)$ ,  $f_2$  – это  $T(X)$ , а  $f_3$  –  $P(X)$ .

Например, для схемы, представленной на рисунке 2 и исходных данных по альтернативным вариантам ИР, представленных в таблице 1, возможно 9 вариантов конфигурации системы интеграции – таблица 2. В ячейках таблицы 2 случаю использованию модуля соответствует 1, не использованию – 0. Значения относительных взвешенных отклонений от оптимумов для возможных конфигураций приведены в таблице 3, причем считается, что весовые коэффициенты частных показателей принимают значения: 0,3 – для показателя точности, 0,3 – для показателя стоимости, 0,4 – для показателя оперативности реализации алгоритма.

Таблица 1. Значения частных показателей качества альтернативных вариантов использования средств моделирования

Средства моделирования	Значения показателей качества		
	Точность	Стоимость (усл. ед.)	Длительность (сек.)
Модуль А-1	0,8	0,05	60
Модуль А-2	0,6	0,15	10
Модуль А-3	0,9	0,34	5
Модуль Б-1	0,7	1,2	90
Модуль Б-2	0,75	2	70
Модуль Б-3	0,79	3,5	60

Таблица 2. Варианты конфигурации системы интеграции

Средства моделирования	Варианты конфигурации								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Модуль А-1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
Модуль А-2	0	1	0	0	1	0	0	1	0
Модуль А-3	1	0	0	1	0	0	1	0	0
Модуль Б-1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Модуль Б-2	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Модуль Б-3	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Таблица 3. Относительные взвешенные отклонения от оптимумов

Показатели	Значения относительных взвешенных показателей для вариантов конфигурации								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Точность	0,000	0,300	0,000	0,063	0,300	0,063	0,142	0,300	0,142
Стоимость	0,300	0,278	0,266	0,126	0,104	0,093	0,034	0,012	0,000
Оперативность	0,000	0,024	0,259	0,047	0,071	0,306	0,141	0,165	0,400
Макс. отклонение	0,300	0,300	0,266	0,126	0,300	0,306	0,142	0,300	0,400

В соответствии с используемым критерием выбора, наилучшим вариантом является конфигурация 4 из таблицы 2, при котором для операции «Расчёт расхода воды» выбран сервис «Нейросетевой расчёт», а для операции «Расчёт глубин в точках» – сервис «Уравнения Сен-Венана».

Как видно из приведенного примера, в практических задачах число  $n$  элементов конфигурации системы ИРИР, допускающих альтернативные варианты реализации, весьма ограничено, а число потенциально возможных вариантов реализации каждого такого средства моделирования не является большим ( $m_i$  варьируется от 2-3 до 5-7). Поэтому размерность задачи выбора даже при использовании полного перебора вариантов (как в приведенном примере) не является высокой, и для современных средств вычислительной техники не является фактором, который может сколько-нибудь заметно влиять на оперативность решения тематических задач мониторинга и управления развитием территорий.

**4. Программно-технологические решения по интеграции данных ДЗЗ и других информационных ресурсов.** Выбор конфигурации информационных ресурсов и привлекаемых средств моделирования однозначно определяет состав данных, в том числе, данных ДЗЗ, которые необходимы для решения заданной тематической задачи. Совместное использование получаемых

разнородных данных обеспечивается применением существующих и созданием новых программно-технологических средств, т.е. решением задач интеграции 2-го типа, в соответствии с введенной выше классификацией.

Ключевым вопросом обеспечения интеграции разнородных данных является организация показанного на рисунке 1 взаимодействия с информационными ресурсами и сервисами, являющимися источниками и потребителями интегрируемых данных. Эти ресурсы и сервисы являются, в общем случае, внешними системами по отношению к разрабатываемому КСА.

Функционально взаимодействие с внешними системами включает ряд операций: 1) формирование структуры необходимых исходных данных, индивидуальных для каждой тематической задачи мониторинга и проактивного управления; 2) выполнение запросов к поставщикам данных в соответствии со сформированными структурами; 3) получение запрошенных данных; 4) заполнение структуры данных, их нормализация и группирование.

Схема взаимодействия с внешними системами, учитывающая разнородность интегрируемых ИР и различия в типах поставляемых данных, показана на рисунке 3. В верхних строках рисунка приведены интегрируемые разнородные данные и интерфейсы, используемые для организации взаимодействия с внешними системами. В качестве примера приведены информационные ресурсы, используемые в задачах прогнозирования речных наводнений [20 – 23]. С точки зрения общности предлагаемого решения принципиальным является рассмотрение 4-х типов источников и потребителей разнородных данных: 1) различные КА ДЗЗ (или различные типы съемочной аппаратуры); 2) ресурсы с пространственными данными; 3) ресурсы с непространственными данными (например, результаты измерений с датчиков и др.); 4) модули (сервисы) моделирования ПТО. При решении других тематических задач конкретный состав интегрируемых информационных ресурсов может различаться, однако предложенный набор типов таких источников, влияющий на способ интеграции данных, является достаточно общим.

Отличительная особенность предложенной схемы и основное решение, обеспечивающее выполнение интеграции разнородных данных, состоит в создании дополнительного слоя абстракции данных (выделен пунктиром). Создание этого слоя позволяет заменить сложные отношения М:М между поставщиками данных и их потребителями (сервисами моделирования) на простые соотношения М:1. То есть большое количество разнообразных связей каждой

модели с каждым поставщиком данных заменяется простой связью моделей со слоем абстракции данных, безотносительно к тому, каким образом эти данные были получены и в каком формате. При необходимости применяемые модели или ПМК снабжаются программными обёртками, которые могут работать со слоем абстракции данных и извлекать требуемую информацию.

При этом внешние информационные ресурсы – поставщики разнородных данных, должны удовлетворять ряду требований, основными из которых являются:

- Наличие у внешней системы программного интерфейса.
- Наличие разделения данных и их представления.
- Использование для передачи текстовых данных общепризнанных форматов XML или JSON.
- Наличие механизмов автоматической аутентификации.

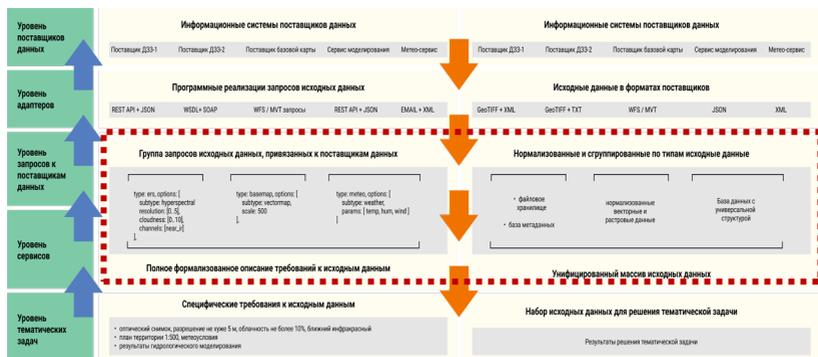


Рис. 3. Порядок взаимодействия с внешними системами при запросе и получении данных

В случае если поставщики данных не удовлетворяют перечисленным требованиям, каждый частный формат получаемых исходных данных приводится к предложенному универсальному формату с помощью системы адаптеров и медиаторов, показанных на рисунке 1 в качестве необходимых компонентов реализации технологии ИРИР. Пример подобного адаптера, выполняющего функции каталогизатора и предварительной обработки данных ДЗЗ, приведен в [43].

Применение предложенного подхода в случае универсализации описания типов данных позволяет интегрировать данные из различных источников не только на физическом и логическом уровнях, но и на семантическом уровне. Это возможно, если

для всех источников подбираются типы данных из справочника Schema.org [44]. При их отсутствии в справочнике для создания нового типа возможно использование механизма расширения Schema.org. Пример семантического описания гидропоста в формате JSON-LD для задачи прогнозирования наводнений приведен в листинге 1.

**5. Структура комплекса средств автоматизации.** Как уже отмечалось, внедрение технологии ИРИР подразумевает разработку комплекса средств автоматизации, основанного на сервис-ориентированной архитектуре и реализующего рассмотренные выше алгоритмы и решения.

Общий состав КСА должен позволять осуществлять интеграцию разнородных данных, среди которых особая роль принадлежит данным ДЗЗ. Данные ДЗЗ, получаемые с различных КА, являются важнейшим компонентом информационного обеспечения проактивного управления развитием территорий. Особое значение они имеют для удаленных и обширных территорий, когда отсутствует возможность использования других средств наблюдения. Создание программно-технологических средств для их автоматического извлечения и подготовки к использованию совместно с другими типами данных в сервисах моделирования является на сегодняшний день малоисследованной задачей. Поэтому в рассматриваемых КСА должны быть предусмотрены соответствующие средства для подготовки данных ДЗЗ.

```
{
  "@context": "https://schema.org",
  "@type": "CivicStructure",
  "name": "Каликино",
  "geo": {
    "@type": "GeoCoordinates",
    "latitude": "46.16",
    "longitude": "60.44"
  },
  "waterLevel": {
    "@type": "Observation",
    "measuredValue": "885",
    "observationDate": "2020-07-25T11:32:31"
  }
}
```

Листинг 1. Пример семантического описания гидропоста «Каликино»

При реализации технологии ИРИР работа с данными ДЗЗ и их обработка совместно с другими данными включает несколько этапов:

1) формирование требований к составу и характеристикам данных ДЗЗ, необходимых для решения каждой конкретной задачи по мониторингу и управлению развитием территорий; формирование на этой основе структуры данных для выполнения запроса в соответствии со схемой на рисунке 3;

2) поиск, подбор, загрузка материалов ДЗЗ на ресурсах поставщиков данных ДЗЗ, подходящих под заданные условия (дата, тип, облачность, угол солнца, разрешение на местности и т.д.), размещение и каталогизацию данных ДЗЗ;

3) предобработка материалов космической съемки, извлечение метаданных, формирование файлов быстрого просмотра и тематических слоев с рассчитанными значениями индексов заданного типа;

4) интеграцию с другими разнородными данными для моделирования состояния объектов и территорий в интересах решения тематической задачи;

5) решение тематических задач на основе обработки данных ДЗЗ, других данных, и результатов моделирования изменения состояния ПТО;

6) публикацию и визуализацию результатов обработки данных ДЗЗ совместно с другими данными, включая возможность выполнения мультивременного анализа для исследования динамики происходящих изменений.

Соответствующий комплекс средств для реализации технологии ИРИР с использованием данных ДЗЗ включает следующие компоненты, показанные на рисунке 4:

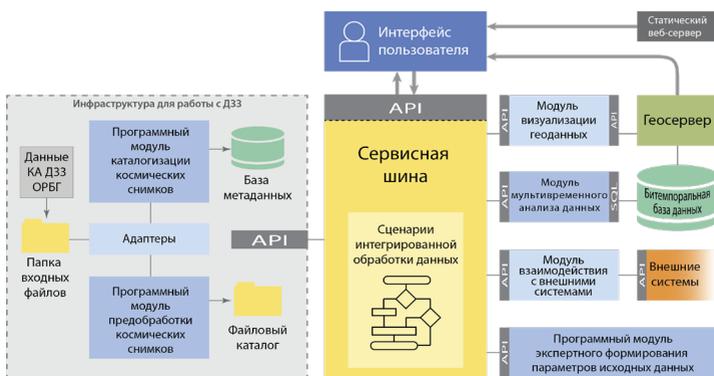


Рис. 4. Структура КСА

- программный модуль экспертного формирования параметров исходных данных ДЗЗ – реализует этап 1;
- программный модуль каталогизации космических снимков – реализует операции этапа 2;
- программный модуль предобработки космических снимков – реализует этап 3;
- программный модуль мультивременного анализа данных – реализует ключевые функции этапа 6.

Задачи этапа 4 выполняются через модуль взаимодействия с внешними системами, этап 5 реализуется с помощью внешних по отношению к КСА ресурсов.

В состав минимально необходимых программно-технологических компонентов, требуемых для реализации технологии ИРИР, также входят сервисная шина и программные адаптеры. Кроме того, необходимыми компонентами при работе с пространственными данными являются геосервер, база данных и модуль визуализации геоданных. Для взаимодействия с потребителями создается пользовательский интерфейс.

Перечисленные модули функционируют согласованно под управлением сервисной шины, в соответствии сценариями интеграции информационных ресурсов. Сценарии определяются в результате использования описанных выше алгоритмов выбора состава привлекаемых информационных ресурсов и средств моделирования ПТО. Взаимодействие с внешними системами для получения исходных данных, используемых при моделировании и решении тематических задач, осуществляется через программный интерфейс в соответствии с описанной выше технологической схемой взаимодействия и алгоритмами функционирования программных адаптеров.

**6. Экспериментальная проверка реализуемости технологии ИРИР.** Тестирование реализуемости технологии ИРИР выполнено при решении ряда тематических задач мониторинга и проактивного управления развитием территорий, отвечающих следующему требованию: решаемые задачи должны показывать возможность интеграции разнородных данных для 3-х случаев:

- 1 – интеграция данных ДЗЗ от разных поставщиков и разных КА;
- 2 – интеграция данных ДЗЗ с другими типами данных (пространственными и непространственными);
- 3 – интеграция данных ДЗЗ с другими типами данных (пространственными и непространственными), а также с результатами

расчетов по моделям изменения состояния ПТО на анализируемой территории с одновременным выбором конкретного сервиса моделирования из числа нескольких имеющихся.

Исходя из этого, определен следующий перечень тематических задач для отработки технологии ИРИР:

1) Мультивременной визуальный анализ динамики изменения индекса биомассы (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) на заданной территории. Решение задачи демонстрирует возможности КСА по интеграции данных ДЗЗ от различных поставщиков.

2) Выявление и оценивание площади лесных гарей после пожаров на основе индекса BAI (Burn Area Index). Решение задачи демонстрирует возможности КСА по интеграции разнородных данных от различных поставщиков данных ДЗЗ, а также данных другого типа – картографических материалов о границах контуров лесных кварталов, и др.

3) Прогнозирование изменения границ природных объектов (например, болот, природно-климатических зон в тундре, и т.п.) Решение задачи демонстрирует возможности КСА для реализации полимодельного подхода к управлению развитием территорий на основе интеграции разнородных данных от различных поставщиков и результатов расчетов по прогнозным моделям.

Вид пользовательского интерфейса КСА при решении тематических задач приведен на рисунке 5.

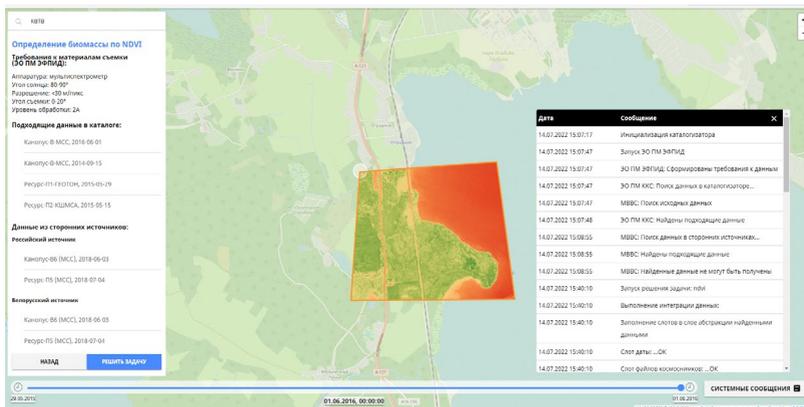


Рис. 5. Визуализация расчёта индекса NDVI

В левой части экрана отображаются: тип решаемой задачи; сформированные автоматически требования к данным ДЗЗ для этой

задачи; поставщики выбранных данных ДЗЗ; необходимые для решения задачи данные других типов; источник данных ДЗЗ для визуализируемых результатов.

В нижней части экрана отображается временная шкала, перемещая которую пользователь может просматривать результаты, относящиеся к разным моментам времени, и анализировать динамику изменений на территории.

В основном поле демонстрируются результаты решения, а также выводятся (по желанию пользователя) служебные сообщения о функционировании КСА и его отдельных модулей.

Для удобства пользования реализован целый ряд дополнительных функций: изменение прозрачности слоев на карте, изменение порядка слоев, показ квиклуксов (файлов быстрого просмотра снимков), и др.

На рисунках 6 и 7 приведены результаты решения задачи 1 для случая, когда необходимо проанализировать изменение индекса биомассы за 2015–2016 гг. В качестве источников данных, подходящих под сформированные требования, определены КА Ресурс П1-ГЕОТОН, снимок от 29.05.2015, и КА Канопус-В-МСС, снимок от 01.01.2016 (с меньшим, по сравнению со снимком КА Ресурс П1, пространственным разрешением).

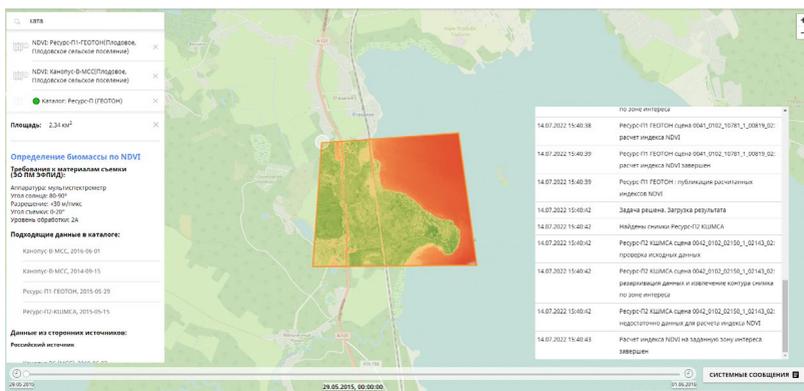


Рис. 6. Результат визуализации индекса NDVI по снимку КА Ресурс П1-ГЕОТОН

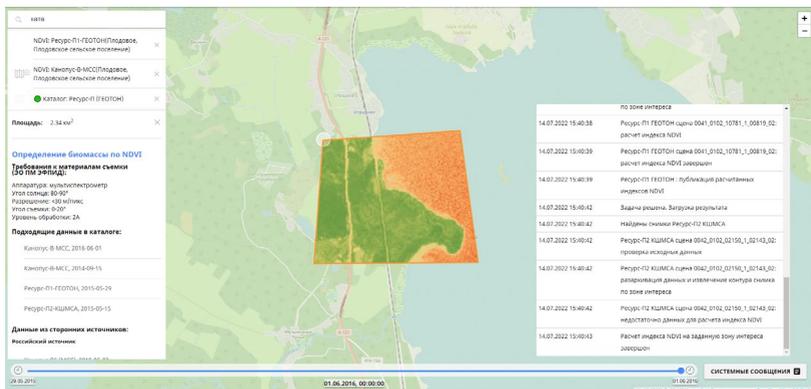


Рис. 7. Результат визуализации индекса NDVI по снимку КА Канопус-В-МСС

В ходе функционирования КСА в автоматическом режиме определены требования к данным ДЗЗ, найдены соответствующие им данные от разных поставщиков и различных КА, произведены расчеты индексов, обеспечена возможность мультитременного анализа результатов путем перемещения ползунка шкалы и изменения прозрачности слоев.

Результаты решения задачи 2 приведены на рисунке 8 для случая, когда необходимо выявить лесные гари на заданном участке территории за 2021 г.

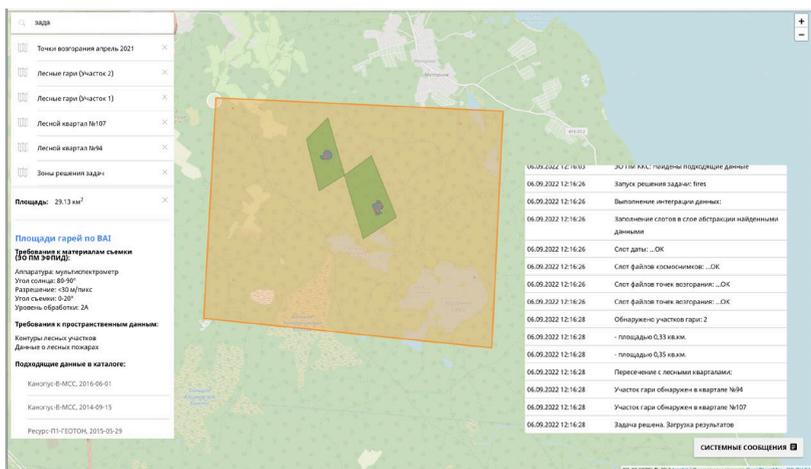


Рис. 8. Визуализация участков с лесными гарями

Здесь, как и в первом случае, в автоматическом режиме определены требования к данным ДЗЗ, найдены соответствующие им данные, а также выявлены участки с гарями, найдены и загружены данные по границам лесных кварталов, соответствующие этим участкам, рассчитана площадь гарей. В рассматриваемом примере отображаются четыре слоя (рисунок 8): «Лесные гари (Участок 1)», «Лесные гари (Участок 2)», «Лесной квартал № 94», «Лесной квартал № 107»).

В качестве задачи 3 рассмотрен достаточно простой пример прогнозирования изменения границ болот на заданном участке территории.

После выбора типа задачи и участка территории также в автоматическом режиме подбираются и загружаются необходимые данные ДЗЗ, выполняется их обработка для идентификации границ природного объекта. Отличительной особенностью задачи является привлечение сторонних моделей для прогнозирования изменения границ болота. Используются два типа моделей с различными значениями целевых показателей: первая из них позволяет проводить расчеты за минимальное время, но с меньшей точностью, при этом у второй модели лучшие показатели по точности, но хуже по оперативности. В зависимости от задаваемых итоговых предпочтений пользователя осуществляется расчет либо по первой, либо по второй модели. Тем самым осуществляется интегрированное использование как разнородных данных, так и результатов расчетов по моделям.

Результат решения задачи 3 представляется в виде, показанном на рисунке 9. Более темным цветом выделен контур природного объекта на дату съемки, определенный в результате обработки данных ДЗЗ, более светлым – результат прогноза. Применяя ползунок временной шкалы, можно осуществлять анализ развития ситуации в будущие моменты времени.

Необходимо отметить, что все полученные результаты не только визуализируются, но и доступны для передачи потенциальным пользователям через стандартные программные интерфейсы, в том числе описанные выше в данной статье.



Рис. 9. Визуализация результатов расчета и прогнозирования изменения границ природных объектов

В целом, результаты отработки и апробации КСА показали работоспособность предложенных решений по реализации технологии ИРИР и возможность достижения высокой степени автоматизации при решении тематических задач мониторинга и проактивного управления развитием территорий. Достигнутая степень автоматизации работы с разнородными данными подтверждается результатами экспериментальной проверки выигрыша в оперативности решения тематических задач. В ходе эксперимента проведено сравнение длительностей выполнения операций работы с данными ДЗЗ, выполняемых специалистами по традиционной технологии, с длительностью тех же операций при использовании КСА. Средняя суммарная длительность выполнения операций работы с данными в случае использования предложенных решений уменьшается не менее, чем в 10 раз без снижения качества получаемых результатов.

**7. Заключение.** Рассмотренные модельно-алгоритмическое обеспечение и программно-технологические решения позволяют автоматизировать процессы интеграции разнородных информационных ресурсов, включающих, в первую очередь, данные ДЗЗ, а также средства моделирования изменения состояния ПТО, при мониторинге и проактивном управлении развитием территорий. Это достигается за счет решения задач выбора состава информационных ресурсов и сервисов моделирования, разработки новых способов и средств интеграции разнородных данных, и создания соответствующих комплексов программного обеспечения.

Представленные результаты отличаются, прежде всего, комплексным использованием ранее совместно не применявшихся алгоритмов формирования структуры систем интеграции и выбора моделей ПТО, а также программно-технологических средств для автоматического формирования массивов разнородных исходных данных, необходимых для выбранных моделей. Такой подход и его реализация в виде целостной технологии ИРИР создают методическую базу и программно-технологическую основу применения методологии и методов квалиметрии моделей и полимодельных комплексов в рассматриваемых задачах проактивного управления развитием территорий.

Проведенные апробация и эксперименты подтвердили реализуемость предложенного подхода к интеграции разнородных информационных ресурсов, возможность сквозной автоматизации всех этапов интеграции, и получение за счет этого значительного выигрыша в оперативности решения задач мониторинга и управления развитием территорий. При этом существенно снижаются требования к пользователям создаваемых средств автоматизации, а также создается принципиальная возможность реализации проактивности при управлении развитием территорий за счет включения моделей прогнозирования состояния ПТО в контур решения тематических задач.

Результаты отраженных в статье исследований показывают принципиальную возможность и перспективность разработок по созданию технологий автоматизации для применения методов квалиметрии моделей и полимодельных комплексов, требующих использования разнородных данных. Направления дальнейших исследований связаны с расширением состава показателей для оценивания и выбора конкретных моделей прогнозирования состояния ПТО, в соответствии с положениями квалиметрии моделей [19], а также с дальнейшей разработкой средств интеграции разнородных данных на семантическом уровне.

### **Литература**

1. Геопортал Роскосмоса. URL: <https://gptl.ru/> (дата обращения: 06.02.2023).
2. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства России. URL: <http://www.nffc.aviales.ru/> (дата обращения: 06.02.2023).
3. Алексеенко Я.В., Фахми Ш.С. Применения информационной системы космического мониторинга МЧС России для обеспечения эффективных управленческих решений по защите населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования

- Земли из космоса". URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6014> (дата обращения 06.02.2023).
4. ВЕГА-PRO. URL: <http://pro-vega.ru/> (дата обращения: 06.02.2023).
  5. Компания «Совзонд». Геоинформационные онлайн-сервисы. URL: <https://sovzond.ru/products/online-services/> (дата обращения: 06.02.2023).
  6. Тематические сервисы Scanex. URL: <https://www.scanex.ru/cloud/> (дата обращения: 06.02.2023).
  7. «ТерраТех»: геоинформационные решения на основе анализа данных дистанционного зондирования. URL: <https://terratech.ru/services/> (дата обращения: 06.02.2023).
  8. Цифровая Земля. URL: <https://dgearth.ru/> (дата обращения: 06.02.2023).
  9. Кучейко А.А. Мировой опыт обеспечения открытого доступа к данным ДЗЗ. Экономические и технологические аспекты // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России. 2020. № 2. С. 50–64.
  10. Заичко В.А., Шведов Д.О., Кутумов А.А. О состоянии и развитии российской государственной космической системы дистанционного зондирования Земли // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России. 2022. № 2. С. 6–17.
  11. Kurbanov E., Vorobiev O., Sha J., Li X., Gitas I., Minakou C., Gabdelkhakov A., Martynova M. A survey on the use of GIS and remote sensing for sustainable forestry and ecology in Russia and China // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2020. vol. 17. no 5. pp. 9–22.
  12. Воройский Ф.С. Информатика. Новый систематизированный толковый словарь-справочник: Введение в современные информационные и телекоммуникационные технологии в терминах и фактах. 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Физматлит. 2003. 760 с.
  13. Охтилев М.Ю., Охтилев П.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Методологические и методические основы проактивного управления жизненным циклом сложных технических объектов // Изв. высш. учебн. заведений: Приборостроение. 2022. № 11. С. 781–788.
  14. Sokolov B.V., Potryasaev S.A., Yusupov R.M. Proactive Management of Information Processes in the Industrial Internet // Journal of Physics: Conference Series. 2021. vol. 1864(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1864/1/012007.
  15. Lasaponara R., Aromando A., Cardettin G., Proto M. Fire Risk Estimation at Different Scales of Observations: An Overview of Satellite Based Methods // Computational Science and Its Applications (ICCSA 2018). Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham. 2019. vol. 10964. pp. 375–378.
  16. Zhuo L. Satellite Remote Sensing of Soil Moisture for Hydrological Applications: A Review of Issues to Be Solved // (Eds.: Scozzari A., Mounce S., Han D., Soldovieri F., Solomatine D.). ICT for Smart Water Systems: Measurements and Data Science. The Handbook of Environmental Chemistry. Springer, Cham. 2019. vol. 102. pp. 259–281.
  17. Previtali M. A GIS and Remote Sensing Approach for Desertification Sensitivity Assessment of Cultural Landscape in Apulia Region (Italy) // (Eds.: Ioannides M., Fink E., Cantoni L., Champion E.). Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham. 2021. vol. 12642. pp. 138–149.
  18. Sokolov B.V., Potryasaev S.A., Zakharov V.V., Pavlov A.N. Methodology and Technologies of the Complex Objects Proactive Intellectual Situational Management and Control in Emergencies // Advances in Intelligent Systems and Computing. Proceedings of the Fourth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI<sup>2</sup>19). 2020. pp. 234–243.

19. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов // М.: РАН. 2018. 314 с.
20. Brown E., Bachmann D., Cranston M., et al. Methods and tools to support real time risk-based flood forecasting – a UK pilot application // FLOODrisk 2016 – 3rd European Conference on Flood Risk Management. E3S Web of Conferences. 2016. vol. 7(18019). 8 p.
21. Зеленцов В.А., Алябян А.М., Крыленко И.Н., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р., Потрясаев С.А., Семёнов А.Е., Соболевский В.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Модельно-ориентированная система оперативного прогнозирования речных наводнений // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 8. С. 831–843.
22. Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Y.G., Bogachenko E.M., Krylenko I.V., Petrakov D.A. Modeling of Extreme Hydrological Events in the Baksan River Basin, the Central Caucasus, Russia // Hydrology. 2021. vol. 8(1). 24 p.
23. Chomba I.C., Banda K.E., Winsemius H.C., Chomba M.J., Mataa M., Ngwenya V., Sichingabula H.M., Nyambe I.A., Ellender B. A Review of Coupled Hydrologic-Hydraulic Models for Floodplain Assessments in Africa: Opportunities and Challenges for Floodplain Wetland Management // Hydrology. 2021. vol. 8(1). no. 44. 12 p.
24. ГОСТ Р 59082-2020. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Продукты обработки данных дистанционного зондирования земли из космоса тематические. Типы задач, решаемых на основе тематических продуктов // М.: Госстандарт России. 2021. 16 с.
25. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А. Архитектура и примеры реализации информационной платформы для создания и предоставления тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Труды СПИИРАН. 2017. Т. 6. № 55. С. 86–113.
26. Пиманов И.Ю. Автоматизация выбора функциональной структуры системы комплексного моделирования чрезвычайных ситуаций // Информатизация и связь. 2021. № 2. С. 15–21.
27. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю. Выбор архитектуры систем интеграции разнородных информационных ресурсов при комплексном моделировании природно-технических объектов // Информатизация и связь. 2021. № 7. С. 72–77.
28. Ахметов Р.Н., Васильев И.Е., Капитонов В.А., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В. Концепция создания и применения перспективной АСУ подготовкой и пуском ракеты космического назначения «Союз-2»: новые подходы к интеграции, интеллектуализации, управлению // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 4. С. 3–54.
29. Wojkić M., Pržulj Đ., Stefanović M. Possible Application of Service-Oriented Architecture in Domain of Land Administration System // Proceedings on 18th International Conference on Industrial Systems (IS'20). 2022. pp. 496–502.
30. Hustad E., Olsen D.H. Creating a sustainable digital infrastructure: The role of service-oriented architecture // Procedia Computer Science. 2021. vol. 181. pp 597–604.
31. Мараховский В.Б., Розенблюм Л.Я., Яковлев А.В. Моделирование параллельных процессов. Сети Петри // СПб.: Профессиональная литература. 2014. 400 с.
32. Мельников Г.П. Системология и языковые аспекты кибернетики // М.: Советское радио. 1978. 368 с.
33. IDEF. URL: <https://www.idef.com/> (дата обращения: 06.02.2023).
34. UML. URL: <https://www.uml.org/> (дата обращения: 06.02.2023).
35. Scheer A.W. The Development Lines of Process Automation // (Eds.: Bergener K., Räckers M., Stein A.). The Art of Structuring. Springer, Cham. 2019. pp. 213–220.

36. BPMN. URL: <https://www.bpmn.org/> (дата обращения: 06.02.2023).
37. Троцкий Д.В., Городецкий В.И. Сценарная модель знаний и язык описания процессов для оценки и прогнозирования ситуаций // Труды СПИИРАН. 2009. № 8. С. 94–127.
38. Flávio E.A. Horita, Porto de Albuquerque J., Marchezini V., Mendiondo E.M. Bridging the gap between decision-making and emerging big data sources: An application of a model-based framework to disaster management in Brazil // Decision Support Systems. 2017. vol. 97. pp. 12–22.
39. Vasiliev Y. SOA and WS-BPEL: Composing Service-Oriented Solution with PHP and ActiveBPEL // Packt Publishing. 2007. 316 p.
40. Юдицкий С.А. Сценарный подход к моделированию поведения бизнес-систем // М.: СИНТЕГ. 2001. 112 с.
41. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч1. Методология, методы, модели // М.: Изд-во МО СССР. 1989. 635 с.
42. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем // М.: Наука. 1982. 286 с.
43. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Семенов А.Е. Программное обеспечение «Каталог-В» для автоматической каталогизации космических снимков. Свидетельство № 2017612870. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.03.2017.
44. CivicStructure. URL: <https://schema.org/CivicStructure> (дата обращения: 06.02.2023).

**Зеленцов Вячеслав Алексеевич** — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: теоретические основы обеспечения надежности и управления эксплуатацией сложных систем, методы и информационные технологии поддержки принятия решений на основе интегрированной обработки наземно-аэрокосмических данных. Число научных публикаций — 350. v.a.zelentsov@gmail.com; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-0103.

**Пиманов Илья Юрьевич** — канд. техн. наук, младший научный сотрудник, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: системы поддержки принятия решений, геоинформационные системы и сервисы. Число научных публикаций — 65. pimen@list.ru; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-0103.

**Потрясаев Семен Алексеевич** — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: системный анализ и исследование операций, теория управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 120. semp@mail.ru; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-0103.

**Поддержка исследований.** Исследования по разделам 1, 2, 3.2, 3.3, 4-6 выполнены в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004. Исследования по разделу 3.1 выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00767, <https://rscf.ru/project/22-19-00767>).

[19-00767](#)). Примеры расчетов выполнены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Северо-Западный центр мониторинга и прогнозирования развития территорий», <https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/2079622/>. Авторы выражают благодарность В.Ф. Мочалову за помощь в обработке данных дистанционного зондирования Земли при тестировании программного обеспечения.

V. ZELENTSOV, I. PIMANOV, S. POTRYASAYEV  
**INTEGRATION OF HETEROGENEOUS INFORMATION  
RESOURCES AND EARTH REMOTE SENSING DATA IN  
MONITORING AND MANAGEMENT OF TERRITORIAL  
DEVELOPMENT**

*Zelentsov V., Pimanov I., Potryasayev S.* **Integration of Heterogeneous Information Resources and Earth Remote Sensing Data in Monitoring and Management of Territorial Development.**

**Abstract.** The article is devoted to the development of model-algorithmic support and software tools for automating the integration of Earth remote sensing data and other heterogeneous information resources in solving problems of monitoring and proactive management of territories development. A distinctive feature of the problem statement is the inclusion of tools for modeling the state of natural and technical objects located in the analyzed territory into the resources should be integrated. The development is based on the justification of the technology for integrating heterogeneous information resources, which includes an algorithm for choosing the type of architecture for the created automation tool complex, a method for describing the information process of integrating data and their joint processing, an algorithm for determining the best configuration of information resources when solving thematic problems, as well as a set of software and technological solutions for integration of remote sensing data with other necessary data and their joint use in modeling. As a result of research and developed algorithms application, it has been established that the most preferred type of systems' architecture for integrating heterogeneous information resources is a service-oriented architecture. To describe the information integration process, it is proposed to use a Business Process Model and Notation. The key component of the development in terms of software and technological solutions for the integration of heterogeneous data is the proposed interaction scheme with data providers and consumers based on data abstraction layer creation. The application of the proposed solution allows you to bring heterogeneous data to a single format suitable for further processing on modeling tools. The testing carried out on specific thematic tasks of monitoring and managing the territories' development showed the feasibility of the proposed integration technology and the developed software tools, as well as the achievement of a significant gain in the rapidness of solving thematic tasks.

**Keywords:** automation, proactive management, information resources, Earth remote sensing data, data integration, complex modeling, service-oriented architecture, multi-objective optimization.

## References

1. Geoportal Roskosmosa [Geoportal of Roscosmos]. Available at: <https://gptl.ru/>. (accessed 06.02.2023). (In Russ.).
2. Informatsionnaya sistema dstantsionnogo monitoringa Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaystva Rossii [Information system for remote monitoring of the Federal Forestry Agency of Russia]. Available at: <http://www.nffc.aviales.ru/>. (accessed 06.02.2023). (In Russ.).
3. Alekseyenko Ya.V., Fakhmi Sh.S. [Application of the space monitoring information system of the Ministry of Emergency Situations of Russia to ensure effective management decisions to protect the population and the territory from natural and man-made emergencies]. Pyatnadsataya Vserossiyskaya otkrytaya konferentsiya

- "Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" [Fifteenth All-Russian open conference "Modern problems of the Earth remote sensing"]. Available at: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6014>. (accessed 06.02.2023). (In Russ.).
4. VEGA-PRO [VEGA-PRO]. Available at: <http://pro-vega.ru/>. (accessed 06.02.2023). (In Russ.).
  5. Kompaniya «Sovzond». Geoinformatsionnyye onlayn-servisy. [Sovzond Company. Geoinformation online services]. Available at: <https://sovzond.ru/products/online-services/>. (accessed 06.02.2023). (In Russ.).
  6. Tematicheskiye servisy Scanex [Scanex thematic services]. Available at: <https://www.scanex.ru/cloud/>. (accessed 06.02.2023). (In Russ.).
  7. «TerraTekh»: geoinformatsionnyye resheniya na osnove analiza dannykh distantsionnogo zondirovaniya ["TerraTech": geoinformation solutions based on the analysis of remote sensing data]. Available at: <https://terratech.ru/services/>. (accessed 06.02.2023). (In Russ.).
  8. Tsifrovaya Zemlya [Digital Earth]. Available at: <https://dgeth.ru/>. (accessed 06.02.2023). (In Russ.).
  9. Kucheiko A.A. [World experience in providing open access to remote sensing data. Economic and technological aspects]. Distsionnoye zondirovaniye Zemli iz kosmosa v Rossii. [Remote sensing of the Earth from space in Russia]. 2020. no. 2. pp. 50–64. (In Russ.).
  10. Zaichko V.A., Shvedov D.O., Kutumov A.A. [On the state and development of the Russian state space system for the Earth remote sensing]. Distsionnoye zondirovaniye Zemli iz kosmosa v Rossii. [Remote sensing of the Earth from space in Russia]. 2022. no. 2. pp. 6–17. (In Russ.).
  11. Kurbanov E., Vorobiev O., Sha J., Li X., Gitas I., Minakou C., Gabdelkhakov A., Martynova M. A survey on the use of GIS and remote sensing for sustainable forestry and ecology in Russia and China. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2020. vol. 17. no. 5. pp. 9–22.
  12. Voroyksiy F.S. Informatika. Novyy sistematizirovannyi tolkovyy slovar'-spravochnik: Vvedeniye v sovremennyye informatsionnyye i telekommunikatsionnyye tekhnologii v terminakh i faktakh. 3-ye izd., pererab. i dop. [Computer science. New systematized explanatory dictionary-reference book: Introduction to modern information and telecommunication technologies in terms and facts. 3rd ed., revised, and additional] Moscow: Fizmatlit, 2003. 760 p. (In Russ.).
  13. Okhtilev M.Yu., Okhtilev P.A., Sokolov B.V., Yusupov R.M. [Methodological and methodological foundations of proactive life cycle management of complex technical objects]. Izv. vyssh. uchebn. zavedeniy: Priborostroyeniye – Proceedings of the higher educational institutions: Instrumentation. 2022. no. 11. pp. 781–788. (In Russ.).
  14. Sokolov B.V., Potryasaev S.A., Yusupov R.M. Proactive Management of Information Processes in the Industrial Internet. Journal of Physics: Conference Series. 2021. vol. 1864(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1864/1/012007.
  15. Lasaponara R., Aromando A., Cardetin, G., Proto M. Fire Risk Estimation at Different Scales of Observations: An Overview of Satellite Based Methods. Computational Science and Its Applications (ICCSA 2018). Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham. 2019. vol. 10964. pp. 375–378.
  16. Zhuo L. Satellite Remote Sensing of Soil Moisture for Hydrological Applications: A Review of Issues to Be Solved. (Eds.: Scozzari A., Mounce S., Han D., Soldovieri F., Solomatine D.). ICT for Smart Water Systems: Measurements and Data Science. The Handbook of Environmental Chemistry. Springer, Cham. 2019. vol. 102. pp. 259–281.

17. Previtali M. A GIS and Remote Sensing Approach for Desertification Sensitivity Assessment of Cultural Landscape in Apulia Region (Italy). (Eds.: Ioannides M., Fink E., Cantoni L., Champion E.). Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham. 2021. vol. 12642. pp. 138–149.
18. Sokolov B.V., Potryasaev S.A., Zakharov V.V., Pavlov A.N. Methodology and Technologies of the Complex Objects Proactive Intellectual Situational Management and Control in Emergencies. Advances in Intelligent Systems and Computing. Proceedings of the Fourth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’19). 2020. pp. 234–243.
19. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov. [Qualimetry of models and polymodel complexes]. Moscow: RAS, 2018. 314 p. (In Russ.).
20. Brown E., Bachmann D., Cranston M., et al. Methods and tools to support real time risk-based flood forecasting – a UK pilot application. FLOODrisk 2016 – 3rd European Conference on Flood Risk Management. E3S Web of Conferences. 2016. vol. 7(18019). 8 p.
21. Zelentsov V.A., Alabyan A.M., Krylenko I.N. et al. A model-oriented system for operational forecasting of river floods. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2019. vol. 89(4). pp. 405–417.
22. Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Y.G., Bogachenko E.M., Krylenko I.V., Petrakov D.A. Modeling of Extreme Hydrological Events in the Baksan River Basin, the Central Caucasus, Russia. Hydrology. 2021. vol. 8(1). 24 p.
23. Chomba I.C., Banda K.E., Winsemius H.C., Chomba M.J., Mataa M., Ngwenya V., Sichingabula H.M., Nyambe I.A., Ellender B. A Review of Coupled Hydrologic-Hydraulic Models for Floodplain Assessments in Africa: Opportunities and Challenges for Floodplain Wetland Management. Hydrology. 2021. vol. 8(1). no. 44. 12 p.
24. GOST R 59082-2020. [Earth remote sensing data from space. Earth remote sensing data processing products themed. Types of tasks solved on the basis of thematic products]. M.: Gosstandart Rossii, 2021. 16 p. (In Russ.).
25. Zelentsov V.A., Potryasaev S.A. [Architecture and examples of implementation of the informational platform for creation and provision of thematic services with use of Earth remote sensing data]. Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings. 2017. vol. 6. no. 55. pp. 86–113. (In Russ.).
26. Pimanov I.Yu. [Automation of selecting the functional structure of a system for complex emergency simulation]. Informatizatsiya i svyaz' – Informatization and communication. 2021. no. 2. pp. 15–21. (In Russ.).
27. Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Pimanov I.Yu. [Choice of architecture for heterogeneous information resources integration systems in natural-technical objects complex modeling]. Informatizatsiya i svyaz' – Informatization and communication. 2021. no. 7. pp. 72–77. (In Russ.).
28. Akhmetov R.N., Vasil'yev I.Ye., Kapitonov V.A., Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V. [The concept of creating and using a promising automated control system for the preparation and launch of the Soyuz-2 space rocket: new approaches to integration, intellectualization, and control]. Aviakosmicheskoye priborostroyeniye – Aerospace Instrumentation. 2015. no. 4. pp. 3–54. (In Russ.).
29. Bojčić M., Pržulj Đ., Stefanović M. Possible Application of Service-Oriented Architecture in Domain of Land Administration System. Proceedings on 18th International Conference on Industrial Systems (IS'20). 2022. pp. 496–502.

30. Hustad E., Olsen D.H. Creating a sustainable digital infrastructure: The role of service-oriented architecture. *Procedia Computer Science*. 2021. vol. 181. pp 597–604.
31. Marakhovskiy V.B., Rozenblyum L.Ya., Yakovlev A.V. Modelirovaniye paralel'nykh protsessov. Seti Petri. [Simulation of parallel processes. Petri nets]. SPb.: Professional'naya literature, 2014. 400 p. (In Russ.).
32. Melnikov G.P. Sistemologiya i yazykovyye aspekty kibernetiki. [Systemology and linguistic aspects of cybernetics]. M.: Sovetskoye radio, 1978. 368 c. (In Russ.).
33. IDEF. Available at: <https://www.idef.com/> (accessed 06.02.2023).
34. UML. Available at: <https://www.uml.org/> (accessed 06.02.2023).
35. Scheer A.W. The Development Lines of Process Automation. (Eds.: Bergener K., Räckers M., Stein A.). *The Art of Structuring*. Springer, Cham. 2019. pp. 213–220.
36. BPMN. Available at: <https://www.bpmn.org/> (accessed 06.02.2023).
37. Trotskiy D.V., Gorodetskiy V.I. [Scenario knowledge model and process description language for assessing and predicting situations]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2009. no. 8. pp. 94–127. (In Russ.).
38. Flávio E.A. Horita, Porto de Albuquerque J., Marchezini V., Mendiondo E.M. Bridging the gap between decision-making and emerging big data sources: An application of a model-based framework to disaster management in Brazil. *Decision Support Systems*. 2017. vol. 97. pp. 12–22.
39. Vasiliev Y. SOA and WS-BPEL: Composing Service-Oriented Solution with PHP and ActiveBPEL. Packt Publishing. 2007. 316 p.
40. Yuditskiy S.A. Stenarnyy podkhod k modelirovaniyu povedeniya biznes-sistem. [Scenario approach to modeling the behavior of business systems]. M.: SINTEG, 2001. 112 p. (In Russ.).
41. Petukhov G.B. Osnovy teorii effektivnosti tselenappavlennykh protsessov. Chast'1. Metodologiya, metody, modeli. [Fundamentals of the purposeful processes' efficiency theory. Part 1. Methodology, methods, models]. M.: Izd-vo MO SSSR, 1989. 635 p. (In Russ.).
42. Mikhalevich V.S., Volkovich V.L. Vychislitel'nyye metody issledovaniya i proyektirovaniya slozhnykh sistem. [Computational methods for research and design of complex systems]. M.: Nauka, 1982. 286 p. (In Russ.).
43. Zelentsov V.A., Potryasayev S.A., Pimanov I.Yu., Semenov A.Ye. Programmnoye obespecheniye «Katalog-V» dlya avtomaticheskoy katalogizatsii kosmicheskikh snimkov. [Software "Catalog-B" for automatic cataloging of space images]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2017612870. (In Russ.).
44. CivicStructure: Available at: <https://schema.org/CivicStructure> (accessed 06.02.2023).

**Zelentsov Viacheslav** — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Chief researcher, Laboratory of information technologies in system analysis and modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: system analysis, reliability theory, methods and information technologies for decision support in complex organizational and technical systems using aerospace data. The number of publications — 350. v.a.zelentsov@gmail.com; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-0103.

**Pimanov Ilya** — Ph.D., Junior researcher, Laboratory of information technologies in system analysis and modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: geographic information systems, web cartography, Earth remote sensing. The number of publications — 65. pimen@list.ru; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-0103.

**Potryasayev Semyon** — Ph.D., Dr.Sci., Leading researcher, Laboratory of information technologies in system analysis and modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: system analysis and operations research, theory of managing the structural dynamics of complex organizational and technical systems. The number of publications — 120. semp@mail.ru; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-0103.

**Acknowledgements.** The research on sections 1, 2, 3.2, 3.3, 4-6 was performed within the budgetary theme No FFZF-2022-0004. The research on Section 3.1 was supported by the Russian Science Foundation grant (project No. 22-19-00767, <https://rscf.ru/project/22-19-00767>). Examples of calculations were performed using the resources of the Core Shared Research Facility «North-West Center for Monitoring and Forecasting the Development of Territories», <https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/2079622/>. The authors are grateful to Victor Mochalov for his help in remote sensing data processing when software testing.