

УДК 004.94

ЕДИНАЯ ПЛАТФОРМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**К.В. Иванов, П.В. Ермаков, А.А. Анищенко, С.А. Беляков,
И.В. Евтушенко, А.В. Голяков (Саров)**

Введение

Важной проблемой имитационного моделирования является отсутствие совместимости моделей, разработанных различными организациями, которое не позволяет оперативно провести требуемый эксперимент. При этом зачастую наряду с несовместимостью моделей между собой отмечается отсутствие их сочетаемости с комплексами имитационного моделирования (КИМ), используемыми для проведения имитационного моделирования.

Анализ публикаций по рассматриваемой проблеме показывает, что в России и за рубежом ведутся работы по созданию как проблемно-ориентированных КИМ [1-3], так и программного обеспечения для имитационного моделирования [4]. Несмотря на то, что многие из этих систем обладают некоторыми встроенными возможностями по расширению функциональности применяемых в них моделей, они не располагают полноценными инструментами для настройки и адаптации компонентов к особенностям применения при построении на их основе целевых КИМ. Наиболее подходящим инструментом для использования в качестве программной платформы создания КИМ по мнению авторов является *STK (Systems Tool Kit)* [5]. Этот инструмент изначально создавался компанией *Analytical Graphics, Inc. (AGI)* для моделирования спутников, но позднее стал позиционироваться как моделирующая платформа общего назначения. С января 2021 года *STK* является частью портфеля программного обеспечения *Ansys* [6] и не доступен для использования на территории России.

Программное обеспечение (ПО) единой платформы имитационного моделирования (далее – Платформа) создается как комплекс программных средств, предназначенный для быстрого создания и интеграции компьютерных моделей имитации сложных технических систем. Платформа использует унифицированный подход, основанный на единых правилах и стандартах, которые обеспечивают совместимость как между компьютерными моделями, так и между её компонентами (программные интерфейсы, форматы данных, протоколы сопряжения).

Платформа предназначена для использования в качестве базовой программной составляющей совместимых между собой моделей и комплексов имитационного моделирования. Для уменьшения трудозатрат при создании КИМ разработчики, благодаря Платформе, могут использовать универсальные программные компоненты: ядро моделирования, математические библиотеки, визуализатор, геоинформационное обеспечение, сервисные подпрограммы и пользовательские графические интерфейсы для обработки входных и выходных данных. Совокупность таких компонент формирует Платформу.

Платформа позволяет создавать КИМ, реализующие мультиагентный подход к моделированию [7], при котором исследуемая система рассматривается как совокупность агентов (имитационных моделей), в общем случае обладающих индивидуальным поведением и свойствами. При этом динамика функционирования исследуемой системы определяется не глобальными правилами и законами, а как результат частного поведения отдельных агентов (имитационных моделей).

Состав Платформы

Платформа включает в себя взаимосвязанные программные компоненты, необходимые для построения и функционирования КИМ.

Каждый модуль обладает своей функциональностью, одни модули можно легко заменять на другие, аналогичные, а их функциональность расширять и дополнять.

Состав Платформы приведён в табл. 1.

Таблица 1. Перечень компонентов Платформы

№	Программный компонент	Краткое описание
1.	Программный комплекс ввода исходных данных и анализа результатов моделирования	Предназначен для подготовки исходных данных имитационного эксперимента, запуска и управления расчётом, анализа результатов расчётов
2.	Программный компонент плагинного расширения	Предназначен для управления плагинами Платформы
3.	Программный компонент поддержки объектной модели данных (ОМД)	Предназначен для работы с ОМД
4.	Программный компонент проведения имитационного моделирования	Предназначен для выполнения расчётов в виртуальном интероперабельном ¹ пространстве в рамках проведения имитационного эксперимента
5.	Программный компонент базовых моделей	Содержит реализации базовых моделей
6.	Программный компонент геоинформационного обеспечения имитационного моделирования	Предназначен для хранения и предоставления доступа к геоинформационным данным

Объектная модель данных

Элементарной единицей данных в рамках Платформы является экземпляр типа данных, называемый объектом. Тип данных формируется в соответствии с набором соглашений и правил, описывающих перечень его параметров, а также взаимосвязи с другими типами. Такое представление данных называется объектной моделью данных и напрямую вытекает из общеизвестной парадигмы объектно-ориентированного программирования.

Для работы с ОМД Платформа содержит:

- конструктор типов данных;
- прикладной программный интерфейс.

Конструктор типов данных предназначен для описания типов объектов. Он позволяет объявить типы данных посредством графического пользовательского интерфейса. Типы данных представлены в виде древовидной структуры, отражающей параметры, которыми будет описываться экземпляр (см. рис. 1).

¹ Интероперабельность – (от англ. interoperability) способность к взаимодействию.

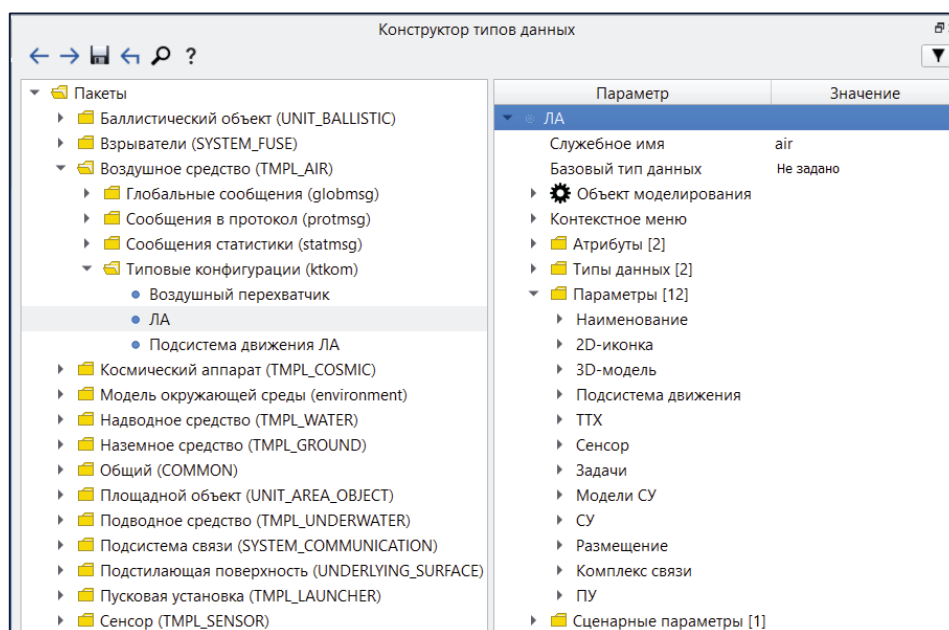


Рис. 1. Графический интерфейс конструктора типов данных

Прикладной программный интерфейс предназначен для создания экземпляров объектов, чтения/записи значения их параметров для обращения ко множеству зарегистрированных в системе объектов.

Пакеты компьютерных моделей

В целях обеспечения отчуждаемости, компьютерные модели (КМ) в Платформе реализуются в виде специализированных пакетов, объединяющих в себе все необходимые для работы модели данные:

- программные модули;
- реализации поведенческих моделей;
- описатели типов данных ОМД;
- данные типовых конфигураций;
- сценарии моделирования.

Таким образом, созданные ранее на базе Платформы КМ могут быть переиспользованы в новых КИМ путём подключения соответствующих пакетов КМ. Одни и те же модели могут быть использованы в разных КИМ.

Конфигурирование КИМ

Созданные на базе Платформы пакеты КМ и плагины объединяются в специальные хранилища – репозитории. Конфигурирование КИМ осуществляется посредством специализированного инструмента, обладающего графическим пользовательским интерфейсом. Пользователь выбирает используемые пакеты моделей и плагины из доступных репозиториях, задаёт параметры, идентифицирующие новый КИМ – название и логотипы. Далее происходит автоматическое копирование моделей и плагинов и развёртывание целевого комплекса с контролем целостности данных (см. рис. 2).

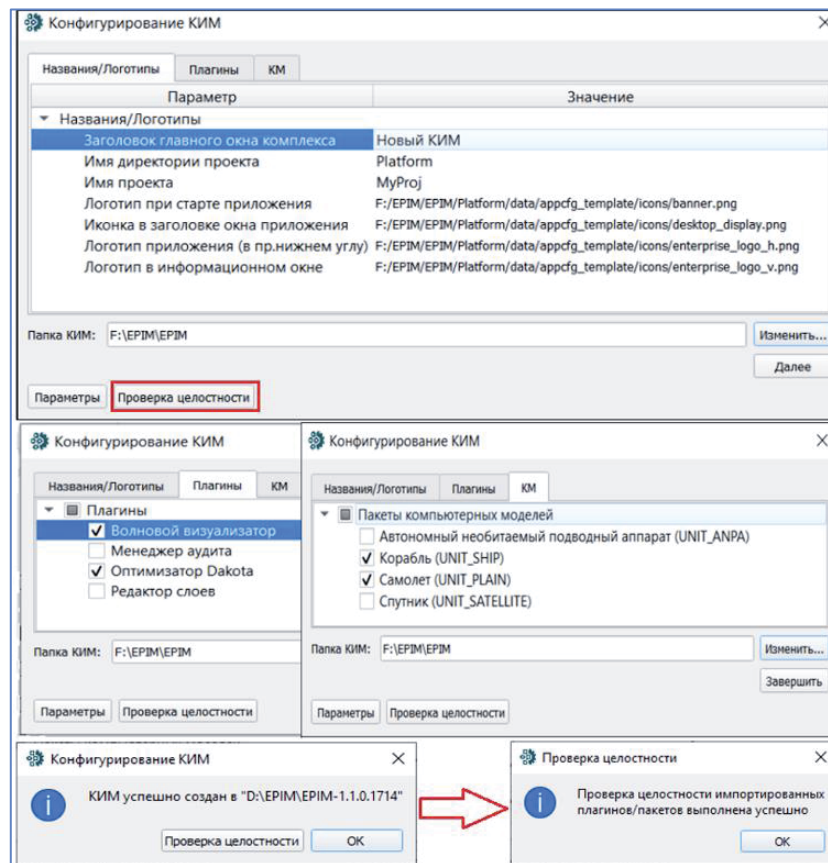


Рис. 2. Графический интерфейс конфигуратора КИМ

Разработка компьютерных моделей

Порядок разработки и интеграции новой КМ в Платформу включает три этапа:

- 1) интеграция на уровне общего информационного пространства: декомпозиция моделей, формирование протокола взаимодействия КМ в КИМ;
- 2) интеграция на уровне исходных данных (конфигурирование объектной модели данных КМ посредством конструктора типов данных);
- 3) интеграция на уровне программных модулей (разработка программного модуля КМ с помощью пакета разработчика (SDK)).

На первом этапе формируется протокол информационно-логического сопряжения разрабатываемой модели, в котором отражается структура модели и все возможные взаимодействия объекта моделирования со сторонними объектами и компонентами Платформы.

На втором этапе, согласно протоколу информационно-логического сопряжения, разрабатывается ОМД компьютерной модели.

Далее, с помощью пакета разработчика, создаётся программный модуль, реализующий логику работы модели.

Пакет разработчика поставляется в двух версиях:

- 1) Visual Studio 2017 в Windows 7, 10;
- 2) для компилятора gcc 10 в Astra Linux 1.7.5.

Программирование поведенческих моделей

В Платформе объекты моделирования могут выполнять задачи – некоторые наборы действий согласно заданному алгоритму поведения. Данные задачи представляют собой поведенческие модели, инвариантные относительно различных сценариев применения объекта в модельном эксперименте.

Поведенческие модели могут быть реализованы в виде:

- программного модуля на языке *C++*;
- поведенческих деревьев;
- программы на встраиваемом языке *LUA*.

Ввод исходных данных

Моделирование в Платформе осуществляется в соответствии со сценарием, который представляет собой набор исходных данных, определяющий состав, структуру и начальные характеристики моделируемых объектов, их пространственное расположение, перечень выполняемых задач.

Ввод исходных данных моделирования подразумевает формирование ОМД сценария моделирования и включает следующие этапы:

- задание конфигурационных параметров модели;
- задание сценарных параметров модели.

Все этапы формирования исходных данных моделирования выполняются с помощью специальных конструкторов: конструктора типовых конфигураций (КТК) и конструктора сценариев (КСМ).

КТК определяет экземпляры типов данных ОМД, представляющие моделируемые объекты, посредством графического пользовательского интерфейса (см. рис. 3). Экземпляры отображаются в виде древовидной структуры, содержащей значения параметров модели. Экземпляры типов данных ОМД, задающие параметры КМ, называются типовой конфигурацией.

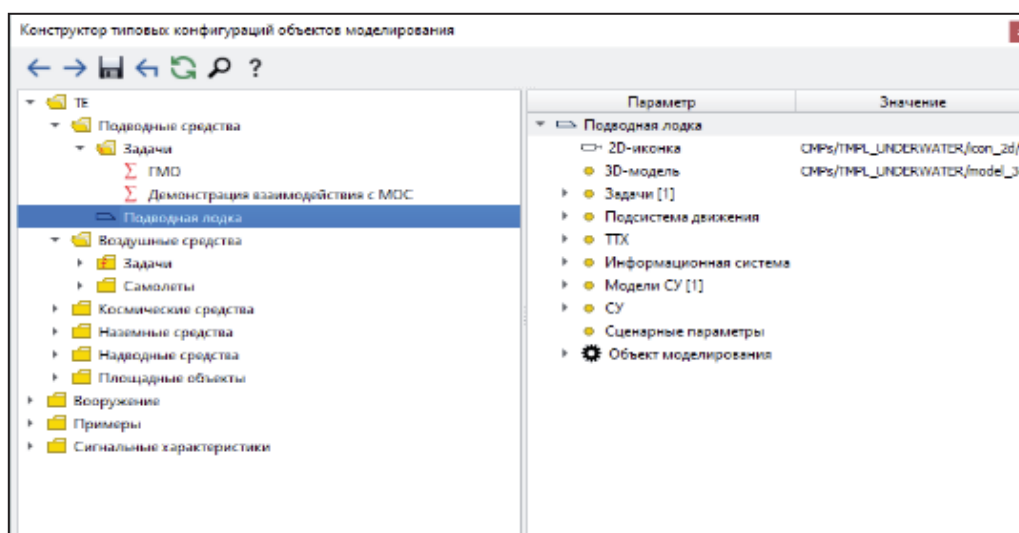


Рис. 3. Графический интерфейс конструктора типовых конфигураций

КСМ создаёт сценарий, в рамках которого необходимо сформировать множество сценарных объектов, сопоставив их с типовыми конфигурациями, определить выполняемые задачи и начальное положение каждого объекта. Выполняются эти действия с помощью редактора древовидной структуры и интегрированного в конструктор визуализатора, позволяющего отобразить начальные условия сценария на геоинформационном фоне (см. рис. 4).

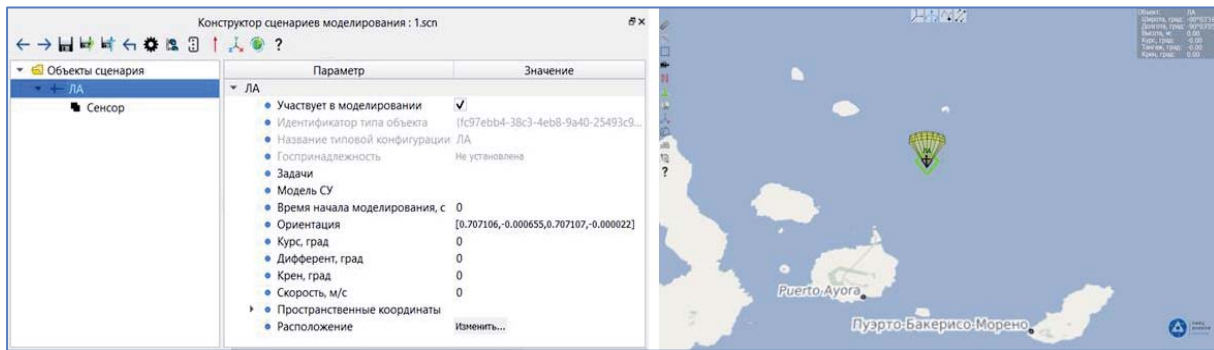


Рис. 4. Графический интерфейс конструктора сценариев

Автоматизация ввода данных

При решении задач задания большого количества начальных сценарных параметров модели или формирования масштабного, в плане количества объектов, сценария неизбежно возникает проблема рутинизации операций, выполняемых посредством конструктора сценариев моделирования.

Для автоматизации этих операций можно использовать информационно-расчётные задачи (ИРЗ). Они позволяют сформировать сценарий посредством выполнения *Python*-скриптов. Таким образом, пользователь может, например, определять местоположение каждого объекта сценария не вручную, а с помощью прикладного программного интерфейса, что на порядки снижает временные затраты.

Актуальными примерами решения задач с помощью ИРЗ могут быть: формирование маршрута движения надводных средств, участки которого по очевидным причинам должны проходить по водной поверхности; случайное размещение множества объектов в некоторой области, подчинённое некоторому закону распределения; формирование спутниковой группировки с участием сотен или тысяч объектов, назначение каждому объекту индивидуальной траектории движения.

Проведение расчётов

Система проведения расчётов Платформы обеспечивает проведение расчётов с использованием исходных данных, подготовленных конструкторами: типов данных, типовых конфигураций и сценариев моделирования.

Расчёт может выполняться как на персональных ЭВМ, так и на удалённых серверах с распределённой памятью. Постановка задач на расчёт выполняется посредством менеджера задач, управляющего ресурсами ЭВМ, на котором развёрнута Платформа.

Поддержка серий расчётов

Под серией расчётов подразумевается группа расчётов, выполняемая для различных вариантов одного сценария. Серии расчётов выполняются с целью выявления закономерностей в зависимостях значений показателей эффективности от значений параметров сценария и позволяют выполнить:

- оценку чувствительности системы;
- поиск области допустимых решений;
- поиск значений параметров, вызывающих отклонение исследуемых показателей системы;
- исследование сходимости моделируемой системы;

Графический интерфейс модуля поддержки серий расчётов показан на рис. 5.

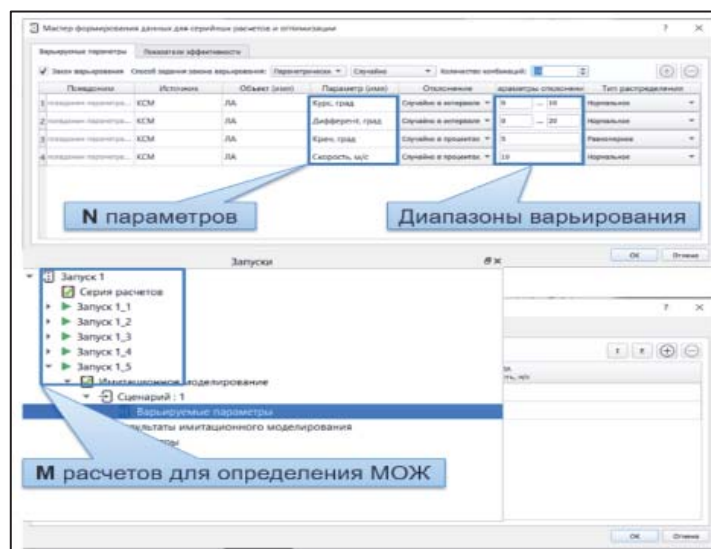


Рис. 5. Графический интерфейс модуля поддержки серий расчетов

Поддержка оптимизационных расчетов

Платформа позволяет проводить оптимизационные расчёты [8], заключающиеся в поиске экстремума целевой функции в процессе варьирования её аргументов. Результаты таких расчётов могут использоваться для:

- оптимизации обликочных характеристик изделий;
- оптимизации тактики применения;
- оптимизации алгоритмов системы управления.

Схема проведения оптимизационных расчётов приведена на рис. 6.

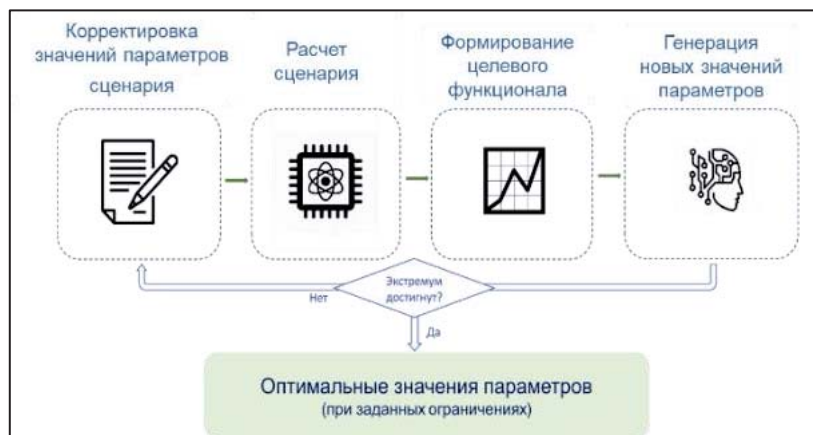


Рис. 6. Схема проведения оптимизационных расчетов

В состав Платформы включён модуль поддержки оптимизационных расчётов, снабжённый графическим пользовательским интерфейсом, предоставляющий пользователю возможности по:

- регистрации целевых функций;
- выбору варьируемых параметров;
- настройке параметров оптимизатора;
- настройке варьируемых параметров;
- настройке вычисляемых функций;
- настройке параметров запуска имитационного моделирования;
- запуску и управлению расчётом оптимизационной задачи;
- анализу результатов решения оптимизационной задачи.

Поддержка удаленных расчетов на супер-ЭВМ

Под термином «супер-ЭВМ» понимается многопроцессорный вычислительный комплекс, предназначенный для интенсивных и ресурсоёмких вычислений (моделирование сложных процессов, обработка сверхбольших объёмов данных, графической информации и т.д.). В Платформе реализована поддержка проведения расчётов на супер-ЭВМ. При этом подготовка исходных данных и анализ результатов моделирования осуществляются на локальном автоматизированном рабочем месте (АРМ), а расчёт проводится на удалённой супер-ЭВМ, подключённой по локальной сети.

Запуск расчётов на удалённых супер-ЭВМ позволяет:

- проводить серии расчётов, содержащие до сотен тысяч реализаций;
- организовать коллективное использование вычислительных ресурсов;
- разгрузить локальные АРМ пользователей за счёт миграции расчётов на удалённые ЭВМ.

Для формирования очереди задач в Платформе используется планировщик задач *Slurm* [9], что обеспечивает совместное использование счётного поля с другим ПО (например, *Ansys* [10], *LOGOS* [11] и др.)

Анализ результатов моделирования

Данные, полученные в результате моделирования, могут быть проанализированы с помощью:

- системы визуализации результатов моделирования на геоинформационном фоне;
- протоколов работы компьютерных моделей;
- системы анализа показателей эффективности.

Система визуализации результатов моделирования на геоинформационном фоне предназначена для интерактивного отображения объектов моделирования, их параметров, динамики их перемещения на геоинформационном фоне. Объекты могут визуализироваться тактическими значками и трёхмерными моделями.

При визуальном отображении результатов моделирования пользователь получает наглядное представление о моделируемых процессах с привязкой ко времени. Отображается траекторная информация подвижных объектов и пространственных зон.

Примеры визуального отображения результатов моделирования на рис. 7.

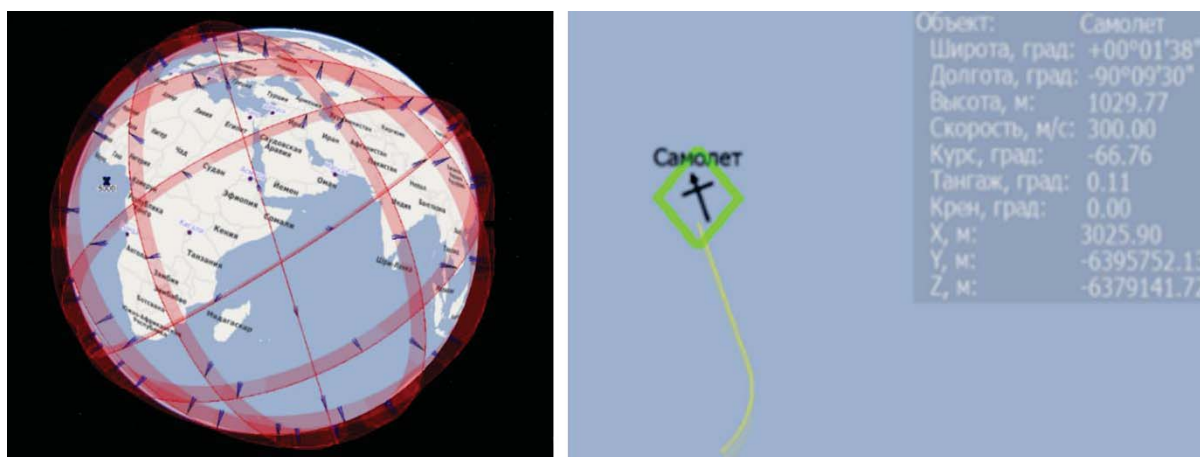


Рис. 7. Примеры визуального отображения результатов моделирования

В процессе визуального отображения результатов моделирования пользователю также предоставляется возможность просмотра протоколов работы моделей. В протоколах работы моделей отображаются значимые события, произошедшие в процессе моделирования. Например, включение/выключение сенсора, начало/окончание выполнения задачи и т.д. Окно протокола работы модели позволяет:

- осуществлять поиск по ключевым словам;
- фильтровать сообщения по различным уровням (информационные, расширенные, отладочные, служебные, сообщения об ошибках);
- сохранять протокол на файловую систему.

Система анализа показателей эффективности предназначена для проведения детального анализа данных, полученных в результате проведенного компьютерного эксперимента и представленных в виде числовых показателей. Данные отображаются в виде таблиц и графиков. Система обеспечивает:

- задание алгоритмов обработки данных и расчёта показателей эффективности на интерпретируемом языке программирования Python;
- представление различных наборов данных в виде графиков зависимостей;
- представление различных наборов данных в виде таблиц;
- настройку стилей отображаемой в графическом виде информации;
- возможность сравнения результатов нескольких запусков;
- формирование отчётов в человекочитаемом формате (pdf, png, jpeg и др.).

Пользователю предоставляется возможность самостоятельного формирования аналитических зависимостей данных (в виде таблиц и графиков), полученных в результате моделирования, с помощью скриптов на языке *Python*.

Система геоинформационного обеспечения

Система геоинформационного обеспечения (СГО) осуществляет геоинформационную и картографическую поддержку моделирующих комплексов, плагинов и компонентов Платформы в едином информационном пространстве при разработке и применении моделирующих комплексов.

Основными задачами, выполняемыми СГО, являются:

1) создание единого геоинформационного пространства картографических данных и данных природной среды (наземной, воздушной, водной и других физических сред) по всему Земному шару для моделирования объектов сил и средств из состава моделирующих комплексов, а также для работы плагинов. Таким образом, ПО, разработанное на базе Платформы, включая моделирующие комплексы и плагины сторонних разработчиков, обеспечиваются геопространственными данными от единого источника информации – системы геоинформационного обеспечения;

2) моделирование типовых условий и факторов природной среды по всему Земному шару, в которой функционируют объекты из состава моделирующих комплексов. Таким образом, все моделирующие комплексы и плагины обеспечиваются готовыми к использованию типовыми наборами геоинформационных данных физических сред для быстрого старта проектов по разработке ПО на базе Платформы;

3) подключение и интеграция внешних компьютерных моделей физических сред сторонних разработчиков в Платформу по унифицированным программным интерфейсам для моделирования специальных условий и факторов природной среды функционирования объектов из состава моделирующих комплексов. Таким образом, разработчики моделирующих комплексов могут гибко применять свои модели природной среды, обеспечивая их интеграцию в единое информационное пространство и расширяя возможности моделирования;

4) обеспечение геоинформационной поддержки (выполнение запросов, визуализация картографических данных и данных природной среды, выполнение прикладных геоинформационных задач и анализ пространственно-логических отношений объектов) ПО, разработанного на базе Платформы, включая плагины и моделирующие комплексы сторонних разработчиков, с помощью единых программных интерфейсов. Таким образом, упрощается разработка и применение моделирующих

комплексов за счёт унифицированного использования готовых функциональных решений СГО;

5) обеспечение геоинформационной поддержки деятельности разработчиков и пользователей моделирующих комплексов, включая инструменты импорта, хранения, администрирования, визуализации, экспорта, обработки и анализа картографических данных и данных природной среды. Таким образом, СГО создаёт комплексную программную среду для управления и использования геопространственных данных, значительно упрощает разработку и применение моделирующих комплексов.

СГО обладает следующими основными преимуществами:

1) унифицированный доступ к данным. Плагины и моделирующие комплексы сторонних разработчиков, Платформа и базовые компьютерные модели получают одинаковый способ доступа к картографическим данным и данным природной среды. Это упрощает интеграцию и снижает вероятность ошибок;

2) совместимость. Единые программные интерфейсы (*API*) гарантируют, что различные компоненты могут взаимодействовать друг с другом независимо от их функционального назначения или способа разработки. Сторонние разработчики могут создавать плагины и моделирующие комплексы, не беспокоясь о том, как они будут интегрироваться с системой – *API* обеспечивают совместимость;

3) ускорение разработки. Разработчикам не нужно создавать свою технологию для доступа к геопространственным данным и выполнения расчётов. Они могут использовать готовые интерфейсы, что значительно ускоряет процесс разработки новых плагинов и моделирующих комплексов;

4) эффективность. Единые интерфейсы оптимизированы для работы с большими объёмами данных и сложных вычислений, что повышает общую эффективность системы;

5) масштабируемость. Система становится более масштабируемой, поскольку расширение функциональности выполняется путём добавления новых компонентов, подключаемых по существующему *API*.

Структура и схема работы СГО приведены на рис. 8.

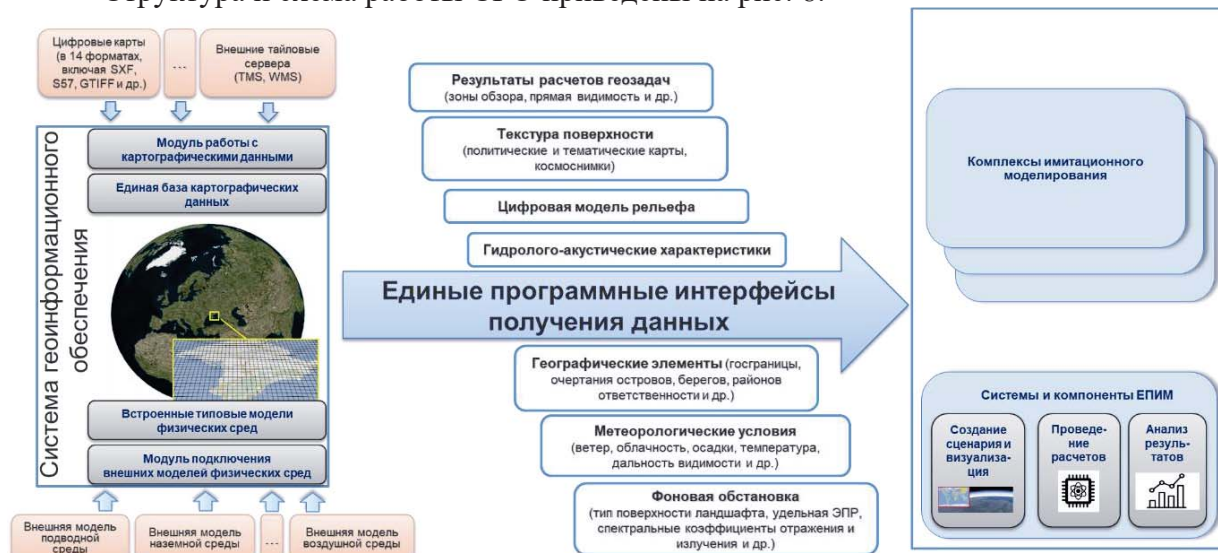


Рис. 8. Структура и схема работы СГО

Базовые модели

В состав Платформы включены базовые упрощённые модели наземных, надводных, подводных, воздушных и космических средств, а также их подсистем.

Модели могут быть использованы как в качестве дополнительных моделей для вновь разрабатываемых КИМ, так и в качестве «самостоятельных» упрощённых моделей для решения оперативных задач.

Дистрибутив включает исходные коды базовых моделей, файлы сценариев моделирования и электронную документацию с примерами решения исследовательских задач, включая подробные пошаговые инструкции.

Библиотека систем координат

В составе SDK Платформы поставляется библиотека систем координат. Она предоставляет простой и удобный интерфейс для решения задач преобразования координат. Библиотека построена на следующих базовых архитектурных принципах:

- модульность. Библиотека разделена на логически независимые модули, каждый из которых отвечает за определённую функцию;
- обобщённое программирование. Используется механизм шаблонов, предоставляющий обобщённый код, способный работать с разными типами данных без необходимости написания нескольких копий кода, что обеспечивает гибкость и оптимальность;
- разделение ответственности. Каждый модуль имеет чёткую ответственность и минимальное взаимодействие с другими модулями. Это упрощает отладку, тестирование и расширение библиотеки;
- расширяемость. Архитектура позволяет легко добавлять новые типы систем координат и алгоритмы преобразования без изменения существующего кода.

Библиотека включает следующий набор реализаций систем координат:

- географическая;
- стартовая;
- экваториальная инерциальная;
- связанная;
- полусвязанная;
- нормальная земная;
- траекторная;
- скоростная.

Модели движения

В список предметов исследования имитационного моделирования [12] часто входят параметры движения объекта. Платформа предоставляет как набор готовых моделей, описывающих движение объекта исследования, так и интерфейс для создания собственных моделей.

Наличие интерфейса формирует единый подход к описанию движения, что обеспечивает глубокий уровень взаимодействия между моделями. Интерфейс модели тесно связан с библиотекой систем координат, что позволяет достичь строгой типизации при описании законов движения, а значит уже на уровне компиляции Платформы осуществляет проверку на наличие потенциальных ошибок. Взаимосвязь с системой координат расширяет способы описания движения, позволяя описывать скоростные характеристики в любых системах координат. Интерфейс определён единственным методом, описывающим зависимость между геоцентрическими координатами и ориентацией, а также их производными от времени, таким образом, обеспечивается неограниченная горизонтальная масштабируемость характеристик движения.

Для быстрого старта можно воспользоваться готовым набором моделей движения. Элементарные кинематические модели описывают движение в прямоугольных и сферических системах координат, с возможностью использования локсодромий и ортодромий. Производные от этих моделей движения формируют список так называемых базовых моделей, которые описывают движения, опираясь уже на физические законы. Например, движение летательного аппарата уже описывается системой дифференциальных уравнений, решение которых позволяет определить положение, ориентацию, скорость и ускорение.

Электронная документация

Электронная документация представляет собой интерактивную базу знаний, интегрированную в Платформу, и включает:

- правила по установке и настройке;
- инструменты графического пользовательского интерфейса;
- принципы работы базовых моделей;
- обучающие примеры по моделированию;
- обучающие примеры по созданию и интеграции пользовательских моделей в Платформе;
- прикладные программные интерфейсы: *C++*, *Python*, *LUA*.

Требования к аппаратной конфигурации и схема развертывания

Компоненты Платформы могут быть развёрнуты как локально, на одном АРМ, так и распределённо, с выделением АРМ пользователей, сервера геоинформационного обеспечения и вычислительного сервера, взаимодействующих по локальной вычислительной сети:



Рис. 9. Схема развертывания компонентов Платформы:

а – распределенная, б – локальная

Требования к аппаратной конфигурации приведены в табл. 2-4.

Таблица 2. Характеристики аппаратной конфигурации автоматизированного рабочего места

Характеристика	Значение
Процессор	Intel Core i7-10700
Объём оперативной памяти, Гбайт	32
Объём дисковой памяти, Тбайт	1
Сетевой интерфейс (пропускная способность)	Ethernet 1000Base-T (1 Гбит/с)
Видеокарта, по техническим характеристикам не ниже	NVIDIA GTX 1660

Таблица 3. Характеристики аппаратной конфигурации вычислительного сервера

Характеристика	Значение
Процессор	AMD Opteron Processor 6174, 2.2 GHz 12 Core
Объём оперативной памяти, Гбайт	32
Сетевой интерфейс (пропускная способность)	Ethernet 1000Base-T (1 Гбит/с)

Таблица 4. Характеристики аппаратной конфигурации сервера геоинформационного обеспечения

Характеристика	Значение
Процессор	Xeon E5-2650 V4
Объём оперативной памяти, Гбайт	64
Объём дисковой памяти, Тбайт	8
Сетевой интерфейс (пропускная способность)	Ethernet 1000Base-T (1 Гбит/с)

Заключение

В настоящее время создана рабочая версия Платформы, которая прошла апробацию в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» и ПАО «МАК «Вымпел». Силами этих предприятий на базе Платформы были созданы и испытаны демонстраторы двух целевых КИМ. Проведенные испытания подтвердили корректность избранных концептуальных подходов, положенных в основу архитектуры Платформы, и возможность ее использования в качестве программной основы для создания КИМ.

Финансирование проекта выполнено Фондом перспективных исследований.

Литература

1. **Богданов О.А., Смиртьонов А.А., Ковалев Д.В.** Имитационное моделирование противоборства в воздушно-космической сфере // Программные продукты и системы / Software & Systems. 2016, № 1 (113).
2. «Комбат» готовит бойцов и проходит модернизацию [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://topwar.ru/164098-kombat-gotovit-bojcov-i-prohodit-modernizaciju.html>.
3. **Резяпов Н., Чеснаков С., Инюхин М.** Имитационная система моделирования боевых действий JWARS ВС США // Зарубежное военное обозрение. 2008, № 11. С. 27-32.
4. **Боев В.Д.** Об адекватности систем имитационного моделирования GPSS World и AnyLogic // Прикладная информатика. 2011, № 4 (34).
5. AGI STK [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.agi.com/stk>.
6. Ansys STK [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/products/systems/stk>.
7. **Швецов А.Н.** Агентно-ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям. // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-

- аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы», 2008. – С. 75-76.
8. **Штойер Р.** Многокритериальная оптимизация: теория, вычисления и приложения // Радио и связь. М., 1992. С. 504.
 9. SLURM: The Simple Linux Utility for Resource Management [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://slurm.schedmd.com>.
 10. ANSYS Workbench [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ansys.com/Products/Platform>.
 11. Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://logos.vniief.ru>.
 12. ГОСТ Р 57700.22-2020 Компьютерные модели и моделирование. Классификация // Стандартиформ. Москва, 2020.