

УДК 004.94:004.8

## ВОЗМОЖНОСТИ ВИЗУАЛИЗАЦИОННО-ИНТЕГРАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ "ОптИМУС" ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВООРУЖЕНИЙ, ВОЕННОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

О. В. Коваленко, И. А. Крючков, А. В. Огородников, Д. В. Ежов, Д. С. Собанин  
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Приводится обзор программных подходов и технологий, используемых в визуализационно-интеграционной платформе ОптИМУС. Показаны возможности взаимной интеграции различных технологий, включая технологии искусственного интеллекта, в едином программном комплексе имитационного мультиагентного моделирования для обеспечения разработки сложных интеллектуальных моделей различных образцов вооружений и военной техники. Даны практические примеры использования приведенных подходов и технологий для моделирования систем физической защиты и создания прогнозной имитационной модели оценки воздействия противника на объекты материально-технического обеспечения Вооруженных сил Российской Федерации.

*Ключевые слова:* визуализационно-интеграционная платформа ОптИМУС, имитационное мультиагентное моделирование, искусственный интеллект, метаэвристическая оптимизация, интеллектуальные агенты, предметно-ориентированный язык, навигационная сеть, вооружения, военная и специальная техника.

### Введение

На сегодняшний день многие крупные предприятия и ведомства России, включая Министерство обороны, занимаются созданием и эксплуатацией программных комплексов (ПК) имитационного моделирования и поддержки принятия решений на всех уровнях функционирования — от проектирования изделий до проведения операций. Как правило, такие ПК подразумевают проведение моделирования и оптимизации поведения действующих или перспективных пространственно-распределенных систем. Анализ результатов моделирования и оптимизации сложных систем позволяет выявить оптимальные режимы функционирования и наиболее подходящие способы управления, оценить возможности моделируемых объектов в различных условиях при заявленных и перспективных характеристиках. Обеспечиваемые в таких ПК качественная визуализация моделируемых процессов с привязкой к геопространству и множество инструментальных технических средств позво-

ляют облегчить выполнение и улучшить качество проводимого анализа.

Различные образцы вооружений, военной и специальной техники (ВВСТ), комплексы и системы военного назначения являются сложными многопараметрическими системами. Совершенствование их характеристик — это длительный и итеративный процесс, который может быть существенно сокращен с применением эффективного имитационного моделирования. При этом уровень качества изделий может быть увеличен за счет:

- практически неограниченного количества модельных экспериментов;
- возможностей поиска оптимальных параметров (в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах);
- доступности современных геоинформационных средств;
- качественных средств анализа и обработки результатов.

Сейчас в мире активно развиваются технологии искусственного интеллекта. Они реализуются в виде различных инструментальных средств, таких как нейросетевые программные библиотеки, библиотеки машинного обучения, библиотеки генетического программирования, библиотеки различных эволюционных алгоритмов, программные продукты создания и анализа онтологий, различные базы знаний, методы и алгоритмы метаэвристической оптимизации, платформы мультиагентного моделирования и т. д.

Интеграция подобных технологий в едином ПК имитационного моделирования позволит разрабатывать существенно более сложные модели, используя эффективно взаимодействующие инновационные программные компоненты. Разработка сложных интеллектуальных моделей средствами такого ПК приведет в перспективе к качественно новому уровню поддержки принятия решений при проектировании ВВСТ, что особо востребовано при прогнозировании поведения сложных систем, при создании и совершенствовании автономных беспилотных аппаратов и т. п.

С целью практического освоения данных направлений авторами ведется разработка визуализационно-интеграционной платформы (ВИП) ОптИМУС [1] для оптимизационного имитационного моделирования и управления системами. В архитектуру данной платформы изначально заложены подходы, позволяющие на разных этапах эксплуатации и разработки использовать ряд технологий искусственного интеллекта. Далее рассмотрим некоторые из них.

### Имитационное моделирование интеллектуальных агентов

В качестве базовой технологии имитационного моделирования в ВИП ОптИМУС выбран подход мультиагентного моделирования, с помощью которого анализируемая система представляется в виде совокупности программных агентов. Имитационная модель, построенная по агентной технологии, описывает поведение децентрализованных агентов, определяющих поведение всей системы в целом. При этом поведение агентов определяется на индивидуальном уровне (рис. 1), а глобальное поведение возникает как результат деятельности множества агентов [2].



Рис. 1. Разнообразие типов и вариантов программных агентов

В мультиагентной платформе организовано взаимодействие по формализованным правилам произвольного количества агентов разных типов, запрограммированных в соответствии с определенными требованиями. Платформа использует единый для всех агентов механизм продвижения по времени и решает вопросы взаимодействия агентов (обмен событиями, сообщениями и т. д.).

Одним из самых трудоемких и критически важных процессов при создании мультиагентных систем является разработка функциональных и поведенческих моделей агентов. В зависимости от требований к агентам, уровня проработанности, сложности предметной области и квалификации разработчиков создание агентов может выполняться различными способами.

В платформе ОптИМУС могут использоваться классические языки программирования высокого уровня (C/C++) и специальные предметно-ориентированные языки (ПОЯ, в англоязычной литературе Domain Specific Language — DSL) [3].

Использование ПОЯ в агентных моделях также относится к технологиям искусственного интеллекта.

ПОЯ, как правило, является расширением регулярного языка программирования. За счет этого свойства обеспечивается полнота ПОЯ. При наличии полноты ПОЯ его можно использовать вместо языка общего назначения для обеспечения быстрой и эффективной разработки логики принятия решений, включая пове-

денческую логику, логику выбора оптимального пути или выбора оптимальной конструкции/структуры. Реализация интеллектуального программного кода на ПОЯ существенно упрощает понимание и сопровождение разрабатываемых моделей агентов (рис. 2).

В качестве составных элементов в логике поведения агентов используются отдельно реализованные программные блоки. В перспективе их могут заменить нейросетевые блоки, ранее обученные для применения в задачах принятия решений. Это даст возможность заранее провести сложные физико-математические расчеты с целью машинного обучения и использовать в имитационных расчетах проверенные обученные функции. При этом сохранятся реалистичность и подробность исходной модели поведения агента со значительным увеличением производительности.

### Навигационные сети в имитационном моделировании

В процессе реального моделирования физических агентов (люди, техника) возникает необ-

ходимость учета геометрии окружающего пространства (рельеф, здания и т. п.). Таким образом, для обеспечения реалистичных моделей при проведении имитационного моделирования требуется реализовать представление окружающей среды, позволяющее максимально реалистично обеспечивать перемещение агентов по местности и интеллектуально оценивать пространственное расположение и геометрию зданий и сооружений. Для этого необходимо обеспечить динамическое построение маршрутов агентов во время расчета с учетом окружающего пространства.

Одним из способов реализации учета геометрии окружающего пространства и построения в нем корректных маршрутов является построение навигационных сетей [4, 5].

Навигационная сеть представляет собой многолистовую поверхность, состоящую из связанных выпуклых многоугольников, отображающих поверхности, по которым может перемещаться центр агента конечных размеров. Таким образом, навигационная сеть получается в результате дискретизации непрерывного пространства в виде графа (рис. 3). Это позволяет свести задачу поиска кратчайшего по заданным крите-

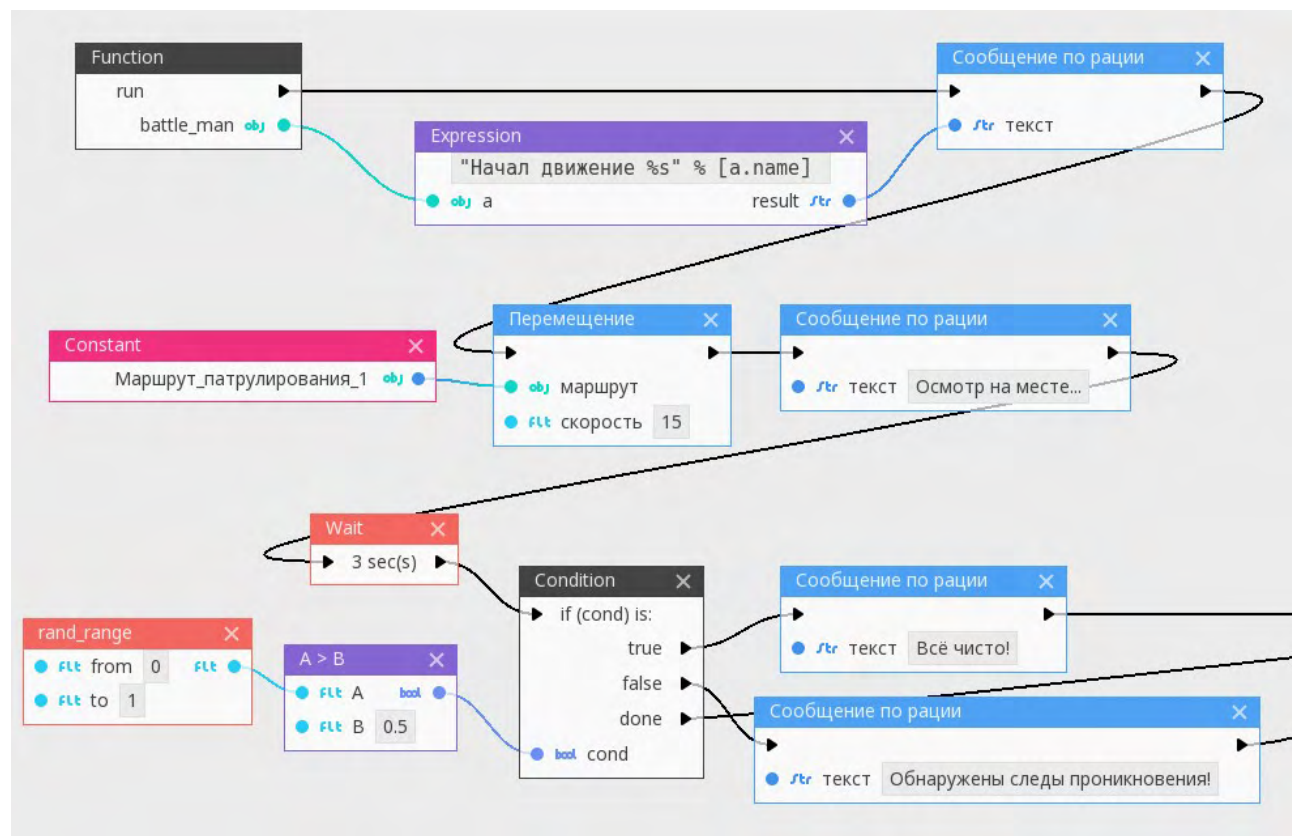


Рис. 2. Пример использования ПОЯ для описания поведения агента

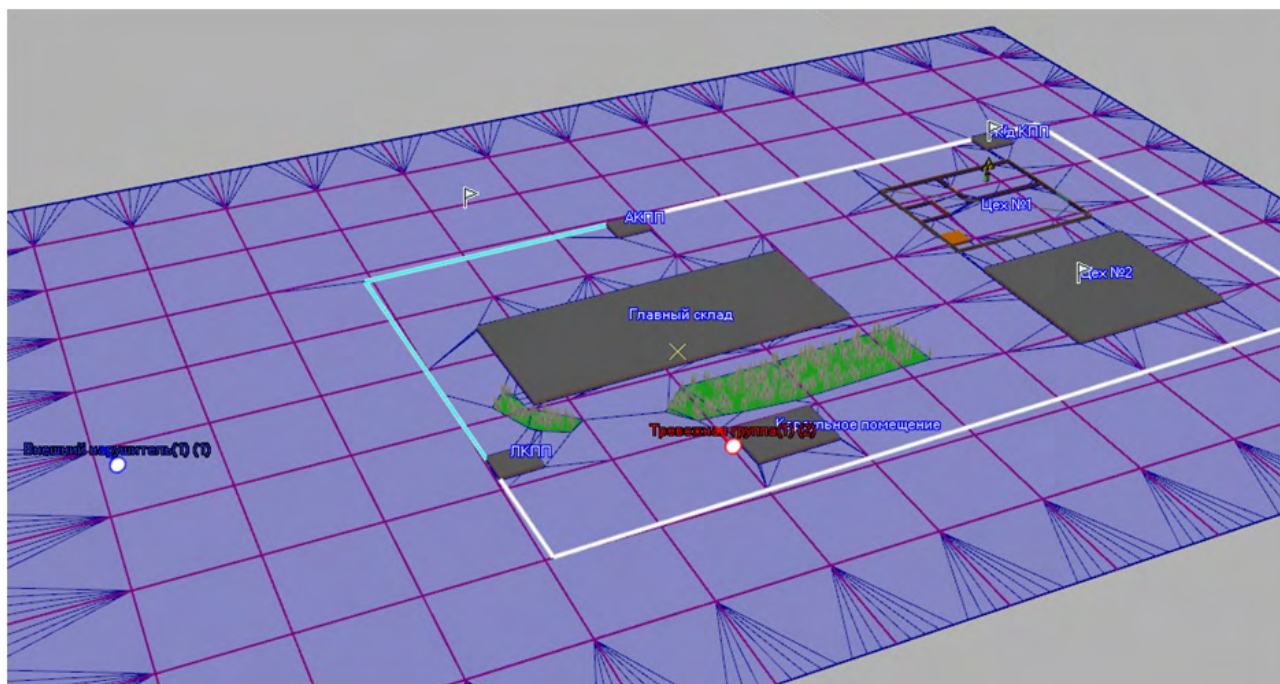


Рис. 3. Пример навигационной сети из выпуклых многоугольников

риям пути в пространстве к задаче поиска кратчайшего пути на графе, которая решается с помощью достаточно быстрых алгоритмов, таких как алгоритм  $A^*$  или алгоритм Дейкстры [3].

Представление окружающей среды в виде навигационной сети в ВИП ОпТИМУС позволило решить следующие задачи:

- 1) быстрый поиск оптимальных маршрутов по заданным критериям;
- 2) построение графов возможных путей перемещения;
- 3) перемещение агента по заданному маршруту;
- 4) определение ближайших к агенту объектов;
- 5) обход статических объектов (зданий, сооружений и т. д.);
- 6) определение видимости.

### Стохастические расчеты и средства оптимизации

В большинстве задач, моделирующих реальные процессы, присутствует значительное количество стохастических и нечетко определенных данных. Для решения таких задач требуется использование математического метода Монте-Карло, итогом которого является усреднение результатов множества расчетов с вычислением математического ожидания.

С другой стороны, часто требуется поиск оптимальной конфигурации или поведения некоторой системы. Система состоит из множества взаимодействующих агентов, каждый из которых обладает своим набором параметров. Задачей может быть поиск такой конфигурации системы и ее элементов, чтобы некий формализованный параметр являлся экстремумом (минимумом или максимумом) целевой функции (например, эффективность, вероятность победы одной из сторон или количественные потери в столкновении). Таким образом получается задача с такой постановкой, которая традиционными методами не всегда решается. Такие практические задачи часто характеризуются следующими математическими свойствами:

- необходимостью поиска глобального оптимума;
- сложным ландшафтом поверхности поиска, связанным, в том числе, с наличием овражности, многомерностью, многоэкстремальностью, многокритериальностью задач с ограничениями;
- отсутствием аналитических выражений для целевых функций, а следовательно, их алгоритмическим представлением и высокой вычислительной сложностью;
- недифференцируемостью и нелинейностью;

- наличием дискретных и непрерывных переменных в целевой функции;
- NP-сложностью задачи.

В математике для решения задач такого класса используют биоинспирированные метаэвристические методы [6]. Эти методы основаны на имитации естественных процессов, заимствованных у живой природы, и реализуют адаптивный случайный поиск. В подобных задачах случайность, как правило, обладает большей эффективностью и позволяет отыскивать хорошие, т. е. достижимые оптимальные (субоптимальные) решения, не всегда определяемые точными методами.

В ВИП ОптИМУС реализованы оптимизационные расчеты методом Монте-Карло, а также ряд эволюционных оптимизационных алгоритмов. На рис. 4 в общем виде приведена схема использования оптимизатора в платформе.

Стохастические и оптимизационные алгоритмы требуют многократного расчета исследуемой модели, что существенно влияет на календарную длительность выполнения исследований. Для решения этой проблемы задействуются возможности многопроцессорных параллельных вычислений, которые позволяют кратно ускорить выполнение расчетов.

### Примеры использования ВИП ОптИМУС для имитационного моделирования ВВСТ

Представленные подходы были опробованы в различных программных продуктах и моделях.

Например, в рамках подготовки к стратегическим учениям органов военного управления "Запад 2017" совместно с НИИ (ВСИ МТО ВС РФ) был разработан вариант прогнозной имитационной модели оценки воздействия противника на объекты материально-технического обеспечения (МТО) в операции на западном стратегическом направлении [7].

Создание прототипа представленного программного продукта выполнялось с использованием базовых возможностей ВИП ОптИМУС. В частности, для ввода исходной обстановки и параметров массированного ракетно-авиационного удара был разработан специализированный пользовательский интерфейс (рис. 5), прогнозные вычисления выполнены методом мульти-агентного моделирования.

На основе методик, предоставленных НИИ (ВСИ МТО ВС РФ), были разработаны программные агенты для разных типов объектов моделирования, а именно сети военных автомобильных и железных дорог, объектов морского, речного и воздушного транспорта, складской инфраструктуры обеспечения горючим, продовольствием, вещевым имуществом. Для всех инфраструктурных объектов реализованы модели поражения, адаптированные к функционированию в режиме имитационного моделирования. Тем самым обеспечена адекватность полученных результатов, а также возможность быстрого и динамичного пересчета.

В прогнозной модели использованы возможности платформы для визуализации результатов моделирования в различных формах: в таблич-

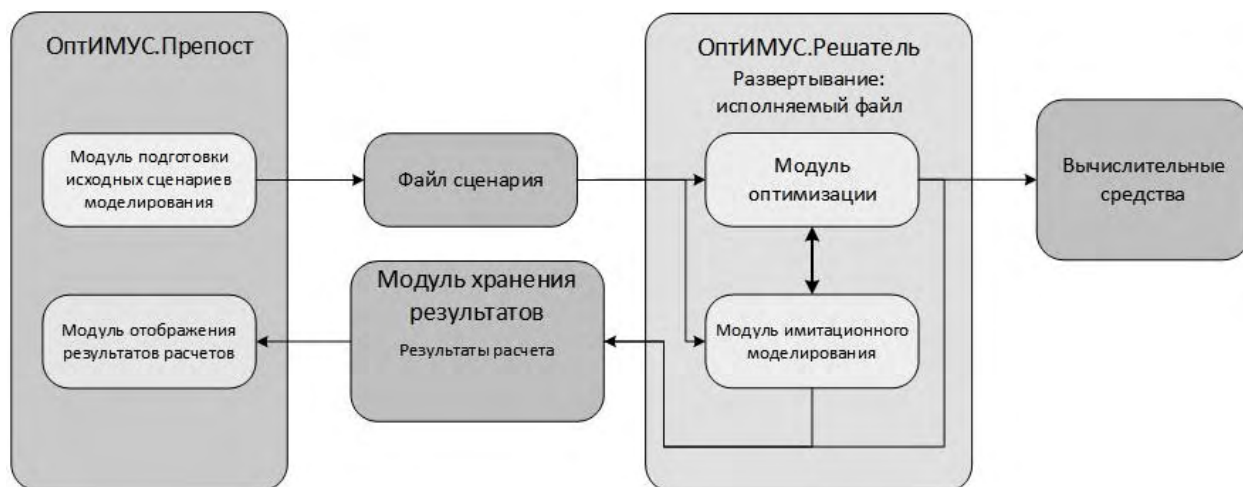


Рис. 4. Схема использования оптимизатора

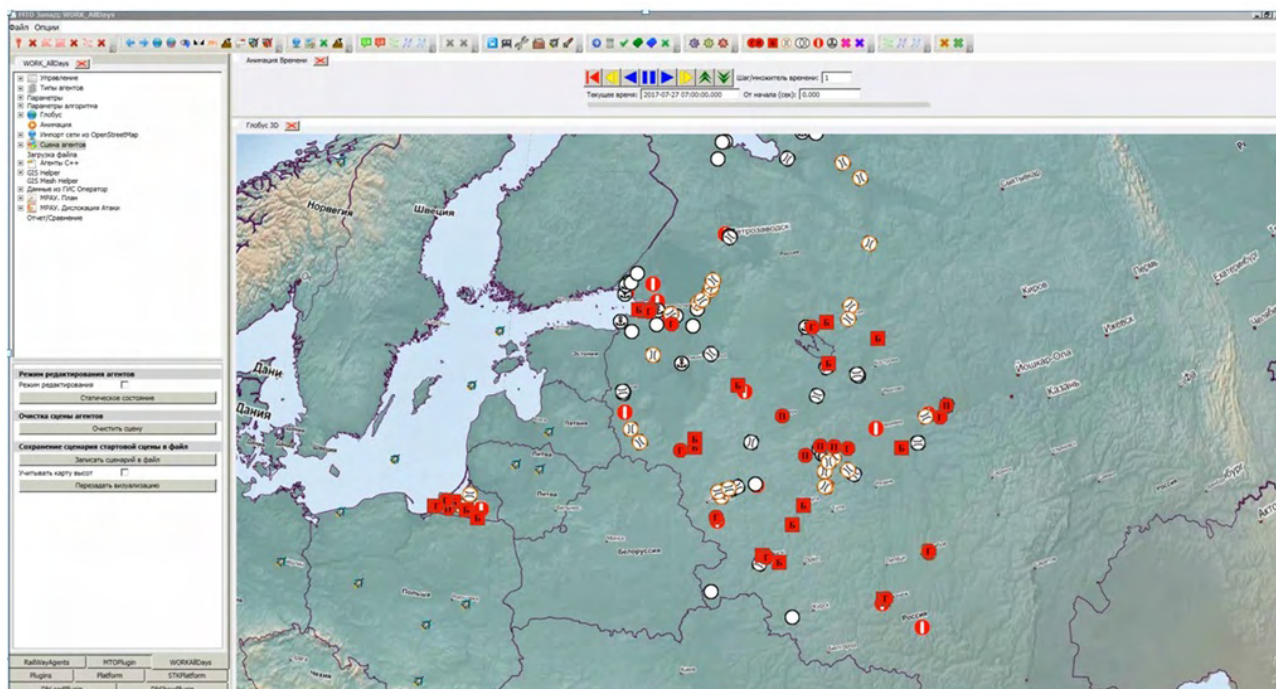


Рис. 5. Интерфейс условной имитационной модели МТО

ном представлении, в виде обобщенных и частных диаграмм, а также в двух- и трехмерном представлениях на виртуальном глобусе (рис. 6).

Еще одним примером использования базовых возможностей ВИП ОпТИМУС является программное обеспечение (ПО) для оценки эффективности (ОЭ) систем физической защиты (СФЗ) ОБЗОР [8]. ПО ОЭ СФЗ ОБЗОР представляет собой интегрированную с единой базой данных среду для мультиагентного моделирования конфликтной ситуации *силы СФЗ – нарушители*, включающую в себя трехмерную среду визуализации на трехмерном глобусе с поддержкой геоданных. Назначением ПО является

ся ОЭ СФЗ различных территориально распределенных объектов, площадок, зданий и т. д. (рис. 7).

Реализация в данном ПО представленных выше подходов (формирование индивидуального поведения интеллектуальных агентов с помощью ПОЯ, использование стохастических расчетов методом Монте-Карло, применение навигационных сетей для перемещения агентов в пространстве) позволила в единой визуальной среде синтезировать всю полноту расчетных и картографических данных для исследуемого объекта, принимать решения по конфигурации СФЗ и делать научно обоснованную оценку их достаточности.

Снижение обеспеченности группировки войск		
Операционное направление	Потери на ОН	ВСЕГО по ЗСН
Балтийское	13,67% 86,33%	65,75%
Смоленское	12,15% 87,85%	
Орловско-Воронежское	41,09% 58,91%	
Кольское	63,73% 36,27%	
Калининградское	51,46% 48,54%	
		34,25%

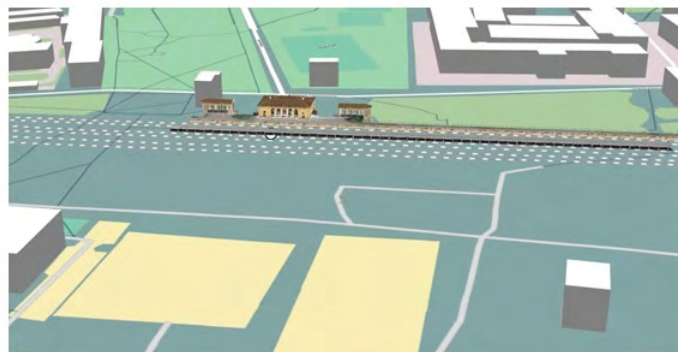


Рис. 6. Фрагменты визуализации условной имитационной модели МТО

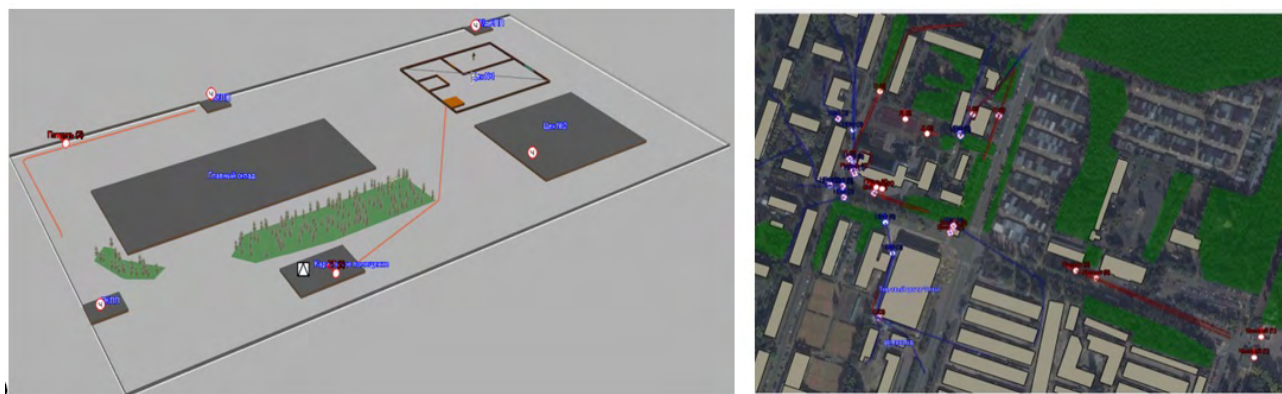


Рис. 7. Примеры условных объектов моделирования в ПО ОЭ СФЗ ОБЗОР

### Заключение

В статье дан краткий обзор ключевых технологий, используемых в ВИП ОпТИМУС. Показаны направления применения, развития и взаимодействия данных технологий в едином ПК. В приведенных примерах моделирования сложных систем показана перспективность использования различных технологий (включая технологии искусственного интеллекта) для определения и обоснования способов применения существующих ВВСТ и формирования тактико-технических требований к перспективным ВВСТ.

### Список литературы

1. Коваленко О. В., Крючков И. А., Ежов Д. В., Огородников А. В., Ерошкина И. В., Собанин Д. С., Хочкин Н. И., Варгина Е. Ф., Тихомиров Ю. В., Рыжик А. В., Васильева Е. А., Кондратьев А. Б. Визуализационно-интеграционная платформа для оптимизационного имитационного моделирования и управления системами (ВИП ОпТИМУС), ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ". Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617157.  
*Kovalenko O. V., Kryuchkov I. A., Ezhov D. V., Ogorodnikov A. V., Eroshkina I. V., Sobanin D. S., Khochkin N. I., Vargina E. F., Tikhomirov Yu. V., Ryzhikh A. V., Vasileva E. A., Kondratev A. B. Vizualizatsionno-integratsionnaya platforma dlya optimizatsionnogo imitatsionnogo modelirovaniya i upravleniya sistemami*

(VIP OptIMUS), FGUP "RFYaTs-VNIIIEF". Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2019617157.

2. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд. / Пер. с англ. М.: "Вильямс", 2006.  
*Rassel S., Norvig P. Iskusstvenny intellekt: sovremenny podkhod. 2-e izd. / Per. s angl. M.: "Vilyams", 2006.*
3. Multi-Agent Programming. Languages, Tools and Applications / Ed. by R. H. Bordini, M. Dastani, J. Dix, A. F. Seghrouchni. Springer Science + Business Media, LLC, 2009.
4. Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A. Formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. SSC4. 1968. Vol. 4 (2). P. 100–107.
5. Demyen D. J. Efficient Triangulation-Based Pathfinding. University of Alberta, 2007.
6. Скобцов Ю. А., Фёдоров Е. Е. Метаэвристики: монография. Донецк: "Ноулидж", 2013.  
*Skobtsov Yu. A., Fedorov E. E. Metaevristiki: monografiya. Donetsk: "Noulidzh", 2013.*
7. Коваленко О. В., Крючков И. А., Огородников А. В., Собанин Д. С., Хочкин Н. И. Использование визуализационно-интеграционной платформы ОпТИМУС для прогнозного имитационного моделирования воздействия противника по объектам материально-технического обеспечения // Отраслевая науч.-практ. конф. "Проблемные вопросы материально-технического обеспечения группировки войск (сил)" (по итогам исследований в ходе ССУ МТО и

СКШУ "Запад-2017"). Санкт-Петербург, 16 ноября 2017 г.

*Kovalenko O. V., Kryuchkov I. A., Ogorodnikov A. V., Sobanin D. S., Khochkin N. I.* Ispolzovanie vizualizatsionno-integratsionnoy platformy OptIMUS dlya prognoznoy imitatsionnoy modelirovaniya vozdeystviya protivnika po obektam materialno-tekhnicheskogo obespecheniya // Otrasleyaya nauch.-prakt. konf. "Problemnye voprosy materialno-tekhnicheskogo obespecheniya gruppировки voysk (sil)" (po itogam issledovaniy v khode SSU MTO i SKShU "Zapad-2017"). Sankt-Peterburg, 16 noyabrya 2017 g.

8. *Коваленко О. В., Собанин Д. С., Ерошкина И. В., Крючков И. А., Хочкин Н. И., Вар-*

*гина Е. Ф., Тихомиров Ю. В.* Программное обеспечение оценки эффективности СФЗ, ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ". Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616230.

*Kovalenko O. V., Sobanin D. S., Eroshkina I. V., Kryuchkov I. A., Khochkin N. I., Vargina E. F., Tikhomirov Yu. V.* Programmnoe obespechenie otsenki effektivnosti SFZ, FGUP "RFYaTs-VNIIEF". Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2018616230.

Статья поступила в редакцию 12.03.19.

FUNCTIONALITY OF THE "OptIMUS" VISUALIZATION AND INTEGRATION PLATFORM FOR SIMULATIONS OF WEAPONS AND MILITARY AND SPECIAL-PURPOSE EQUIPMENT / O. V. Kovalenko, I. A. Kryuchkov, A. V. Ogorodnikov, D. V. Ezhov, D. S. Sobanin (FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, Nizhny Novgorod Region).

The paper provides an overview of the software approaches and technologies employed in the OptIMUS visualization and integration platform. We demonstrate capabilities of the platform for mutual integration of different technologies, including artificial intelligence (AI), in a single program package for multi-agent simulations enabling the development of sophisticated intelligent models of different weapons and military equipment designs. Practical examples are provided to show how these approaches and technologies can be used to simulate physical protection systems and develop predictive models of adversary impact on logistics entities of the Armed Forces of the Russian Federation.

*Keywords:* OptIMUS visualization and integration platform, multi-agent simulation, artificial intelligence, meta-heuristic optimization, intelligent agents, domain-specific language, navigation network, weapons, military and special-purpose equipment.

---