

С.А. Антипова, кандидат физико-математических наук

М.Н. Волков, кандидат технических наук

А.С. Якшин, кандидат технических наук

### **Применение инструментальных средств имитационного моделирования для анализа процессов перевозки войск (сил)**

*В статье рассматривается задача поиска наилучшего варианта организации перевозки войск (сил) железнодорожным транспортом с использованием среды моделирования AnyLogic. Имитационная модель оперативной перевозки соединений (частей) объединения при перегруппировке предназначена для сокращения времени планирования перевозок войск железнодорожным транспортом при подготовке и в ходе проведения операций (боевых действий). Разработанная имитационная модель позволяет оптимизировать количественные временные показатели перевозки, используемые при осуществлении планирования.*

В настоящее время роль железнодорожного транспорта в обеспечении стратегической мобильности Вооруженных Сил, учитывая огромную территорию нашей страны, низкую плотность автомобильных дорог и недостаточное развитие других видов транспорта, следует признать ключевой [1, 2]. Особую актуальность при этом приобретает задача поиска наилучшего варианта организации перевозочного процесса войск (сил), что возможно на основе оптимизационного подхода, который базируется на математическом (имитационном) моделировании.

Под моделированием традиционно понимается способ, при котором исследование объекта (оригинала) проводится через опосредующее звено-посредник (модель) [3]. Модель при этом – мысленно представляемая или материально реализованная система, которая, отображая или воспроизводя объект исследования, способна замещать его так, что ее изучение дает нам новую информацию об этом объекте [4].

В настоящее время широкое распространение получили методы математического моделирования. Их можно условно разделить на две основные группы – аналитические и имитационные. При использовании аналитических методов построение модели производится в виде символов и отношений, при этом вывод необходимых зависимостей происходит последовательным применением математических правил [5]. Имитационное моделирование [6, 7] представляет собой процесс создания и исследования модели, направленный на изучение поведения системы, либо на получение оценки различных стратегий, обеспечивающих функционирование системы. Оно является частным случаем математического моделирования и в нем присутствует возможность достаточно точно описывать большое число объектов, для которых затруднена или невозможна разработка аналитических моделей.

В настоящее время большинство из этапов имитационного исследования являются в разной степени автоматизированными, а результаты исследования во многом зависят от выбранной среды имитационного моделирования. Чтобы проанализировать основные требования к программным средствам разработки имитационных моделей, необходимо сформулировать критерии, согласно которым они оцениваются.

Критерии сравнения программных средств разработки имитационных моделей для применения в интересах перевозки войск (сил) можно разделить на три категории:

- функциональные требования;

- требования совместимости;
- требования к сертификации и лицензированию.

К функциональным требованиям относится универсальность применения, под которой понимается способность программной среды использовать все основные направления имитационного моделирования – системную динамику, дискретно-событийный и агентный подходы. Кроме того, сюда же следует отнести возможность использования комбинации этих технологий. Требования, предъявляемые к совместимости, сертификации и лицензированию, продиктованы спецификой технического и программного обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации.

Наиболее предпочтительной для решения задачи перевозки войск железнодорожным транспортом с точки зрения функциональных возможностей выглядит среда моделирования AnyLogic [8].

Имитационная модель оперативной перевозки соединений (частей) при перегруппировке предназначена для сокращения времени планирования перевозок войск железнодорожным транспортом при подготовке и в ходе проведения операций (боевых действий). Рассматриваемая имитационная модель позволяет получить количественные показатели времени перевозки, используемые при осуществлении планирования.

Предпосылкой для проведения моделирования является необходимость планирования стратегической перегруппировки войск (сил) из Центрального военного округа в состав Восточного военного округа железнодорожным транспортом по двум маршрутам: Транссибирской и Байкало-Амурской железнодорожным магистралям. Обязательным условием является необходимость учесть при планировании возможное воздействие на инфраструктурные объекты в процессе перевозки. В рамках рассматриваемой модели после вероятного воздействия на инфраструктурные объекты, приводящего к невозможности их дальнейшего использования (образование барьерного рубежа), производится перенаправление эшелонов на обходной маршрут.

Методика расчета временных характеристик процесса перевозки войск представляет собой совокупность последовательных взаимосвязанных расчетных операций, основу которой составляет выражение (1).

$$T_{расч} = \frac{t^n}{24} + \frac{L}{V} + \frac{t^e}{24} + \frac{N-1}{n}, \quad (1)$$

где  $T_{расч}$  – расчетная суммарная продолжительность перевозки, сут.;

$L$  – протяженность маршрута перевозки, км;

$V$  – маршрутная скорость перевозки, км/сут.;

$t_n, t_e$  – среднее время погрузки и выгрузки эшелона, ч.;

$N$  – общее количество перевозимых эшелонов, эшел.;

$n$  – темп перевозки эшелонов, эшел./сут.

Описанная методика не позволяет рассчитать влияние разрушений инфраструктурных объектов на общую длительность процесса перевозки. Кроме того, следует отметить отсутствие в ней возможности учета случайных параметров рассматриваемого процесса. Учитывая описанные выше недостатки методики, а также сложность разработки комплексного аналитического описания, использование имитационного моделирования становится приоритетным методом исследования.

Целью проводимого имитационного моделирования является определение временных характеристик процесса перевозки железнодорожным транспортом при перегруппировке войск, что позволит сформировать рациональные варианты организации перевозочного процесса в заданных условиях оперативной обстановки.

К статическим элементам разрабатываемой модели следует отнести железнодорожную сеть, с учетом разрушений инфраструктурных элементов, а также железнодорожные станции выгруз-

ки (погрузки). В качестве динамического элемента моделирования рассматривается оперативный эшелон. Детализация ниже уровня эшелона не производится.

Исходными данными для проведения моделирования служат директивные параметры перевозочного процесса и параметры железнодорожных станций, которые подготавливаются оператором и представляются перед началом моделирования в виде файла.

Моделирование процесса перевозки должно включать в себя следующие этапы:

1. Распределение эшелонов по станциям погрузки.
2. Отправление с учетом погрузочной способности станций.
3. Движение по маршрутам следования с учетом темпа перевозки и пропускной способности железнодорожной магистрали.
4. При возникновении разрушений на маршруте следования (момент воздействия задается оператором в процессе моделирования) перенаправление эшелонов на обходной маршрут.
5. Ожидание выхода на обходной маршрут с учетом пропускной способности железнодорожной магистрали.
6. Движение по обходному маршруту следования с учетом пропускной способности железнодорожной магистрали.
7. Распределение эшелонов по станциям выгрузки.
8. Получение временных характеристик процесса перевозки по каждому эшелону.

Разработанная в графическом редакторе логическая схема модели представлена на рисунке 1 и содержит: области задания внешних данных, переменных, параметров и агентов; участок схемы, реализующий нанесение условных обозначений на карту с использованием геоинформационной системы (ГИС) OpenStreetMap. Динамические объекты, проходя по элементам структурной схемы, реализуют заданные алгоритмом действия: погрузку и отправление эшелонов; выбор маршрута следования; движение по маршрутам и перенаправление эшелонов в случае воздействия по инфраструктурным объектам противником.

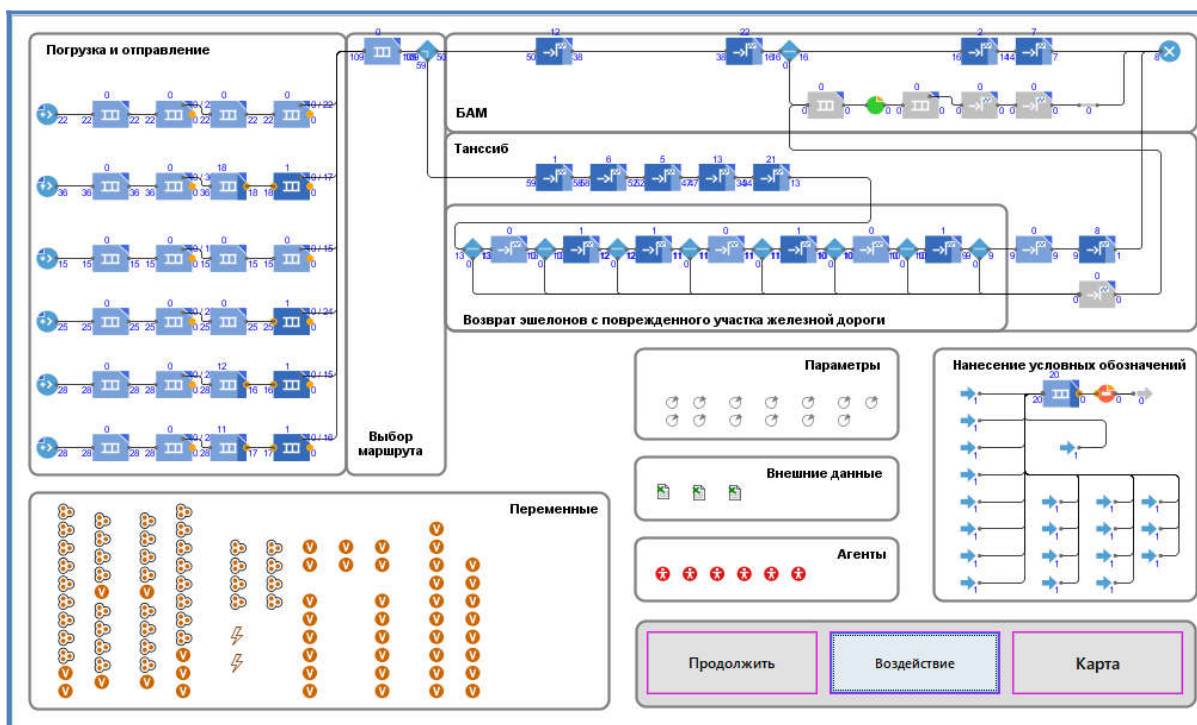


Рисунок 1 – Логическая схема процесса перевозки общевоинского объединения железнодорожным транспортом при перегруппировке

Центральную часть экрана (рисунок 2) занимает ГИС-карта, которая является источником маршрутов при движении динамических объектов. В поле ГИС-карты размещены стрелочные и цифровые часы оперативного времени. Цифровые часы предназначены для индикации оперативного времени в сутках.

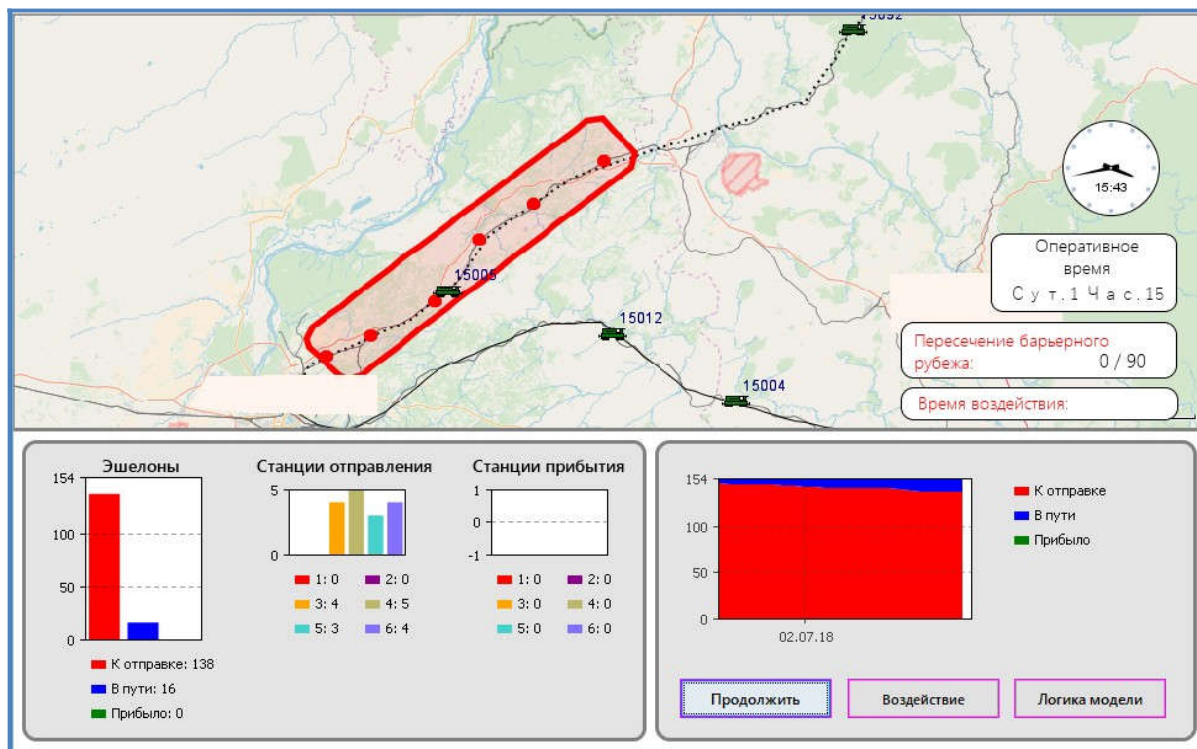


Рисунок 2 – Рабочий интерфейс модели






Логическая схема содержит: области задания внешних данных, переменных, параметров и агентов; участок схемы, реализующий нанесение условных обозначений на карту с использованием геоинформационной системы (ГИС) OpenStreetMap. Динамические объекты, проходя по элементам структурной схемы, реализуют заданные алгоритмом действия: погрузку и отправку эшелонов; выбор маршрута следования; движение по маршрутам и перенаправление эшелонов в случае воздействия по инфраструктурным объектам противником.

Центральную часть экрана (рисунок 2) занимает ГИС-карта, которая является источником маршрутов при движении динамических объектов. В поле ГИС-карты размещены стрелочные и цифровые часы оперативного времени. Цифровые часы предназначены для индикации оперативного времени в сутках. Поле «Пересечение барьерного рубежа» отражает количество эшелонов, прошедших барьерный рубеж из числа направленных по Транссибирской магистрали. В поле «Время воздействия» фиксируется момент времени, когда оператор производит имитацию воздействия по инфраструктурным объектам. Ниже области ГИС-карты размещены три столбчатые диаграммы. Левая диаграмма отражает общее количество эшелонов, готовых к отправке, находящихся в пути и прибывших на станции выгрузки. Центральная и правая диаграммы показывают динамику процессов погрузки и выгрузки эшелонов по станциям. Правую нижнюю часть экрана занимает область, содержащая кнопочные органы управления моделью и временную диаграмму с накоплением, отражающую общую динамику процесса перевозки. После постановки процесса моделирования на паузу рядом с графическим обозначением эшелона отображается его номер, что позволяет более детально представить динамику процесса перевозки.

Условные обозначения, нанесенные на ГИС-карту, представлены в таблице 1.



Таблица 1 – Условные обозначения

Обозначение	Наименование
	Транссибирская железнодорожная магистраль
	Байкало-Амурская железнодорожная магистраль
	Станция погрузки (выгрузки) войск
	Разрушенный участок железной дороги
	Оперативный эшелон

Возможность гибкого масштабирования визуализации на ГИС-карте позволяет как рассмотреть весь процесс целиком, так и детально увидеть процедуры погрузки и выгрузки. В произвольный момент времени может быть произведено моделирование разрушения инфраструктурных объектов на маршрутах перевозки. После нажатия на кнопку «Воздействие» модель переходит в режим паузы, на экране фиксируется время разрушения и количество эшелонов успевших пересечь барьерный рубеж. После повторного запуска процесса моделирования (кнопка «Продолжить») эшелоны, прошедшие барьерный рубеж, продолжают движение на станции выгрузки. Эшелоны, не прошедшие барьерный рубеж, перенаправляются на обходной маршрут (рисунок 3).

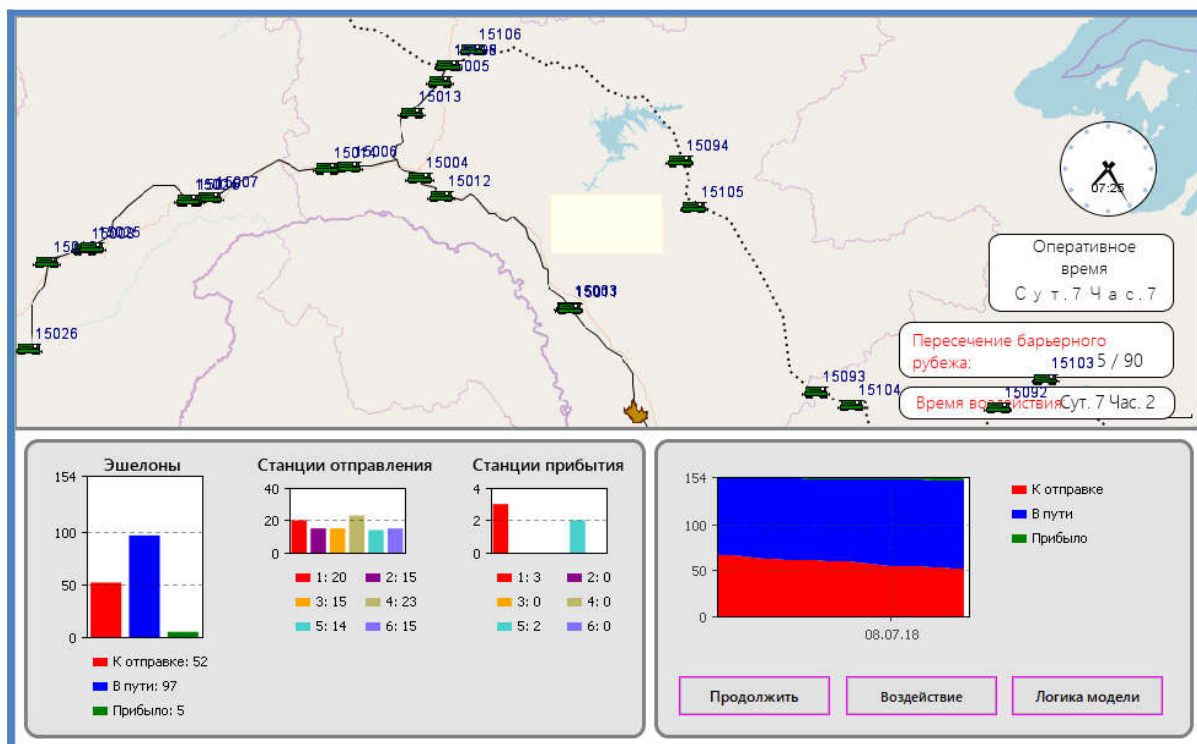


Рисунок 3 – Возврат эшелонов с разрушенного участка и перенаправление на обходной маршрут

Результатом работы описанной имитационной модели является численное значение прогнозируемого времени перевозки по каждому эшелону. Использование модели позволяет сформировать рациональные варианты организации перевозочного процесса в заданных усло-

виях оперативной обстановки. Разработанная логическая схема модели может быть применена при планировании оперативной перевозки войск различных по составу объединений, на любых операционных и стратегических направлениях.

Значительный интерес представляет исследование разработанной модели для определения влияния времени возникновения барьерного рубежа на общее время перевозки войск. В рамках поставленной задачи было проведено два эксперимента варьирования параметров. Цель проводимого исследования – определение оптимального времени прохождения эшелонами маршрута при условии возникновения барьерного рубежа.

Оптимизируемым параметром при проведении первого эксперимента является общее время перегруппировки войск (сил). В эксперименте исследуется влияние входного параметра модели – «время воздействия». Диапазон возможных значений данного параметра определяется продолжительностью периода перевозки и ограничивается нормативными значениями. На рисунке 4 представлен график результатов первого эксперимента.



Рисунок 4 – График влияния времени воздействия на общее время перевозки

Анализ графика показывает наиболее критичный период процесса перегруппировки войск (сил), когда воздействие на барьерный рубеж существенно влияет на общее время перегруппировки. На основании чего можно сделать вывод о необходимости принятия дополнительных мер обеспечения безопасности уязвимого участка пути в течение данного промежутка времени. Длительность использования усиленных мер безопасности определяется оперативной необходимостью и располагаемыми силами и средствами.

Показателем, требующим минимизации, для второго эксперимента, как и в случае первого, является общее время перегруппировки войск (сил), но в этом случае также исследуется влияние параметра «скорость поездов» на значение целевой функции. Диапазон возможных значений изменяемого параметра ограничивается задаваемой минимальной и максимальной скоростями эшелонов по железнодорожному пути. Шаг изменения параметра в каждой итерации составляет 5 км/ч.

Анализ следующего графика, представленного на рисунке 5, показывает, что увеличение скорости движения эшелонов практически линейно влияет на уменьшение времени перегруппировки вплоть до достижения скоростного режима в 53-58 км/ч. В этом случае увеличение скорости поезда на 5 км/ч сокращает общее время перегруппировки в среднем на сутки. После

достижения скорости поездов в 60 км/ч эффект от дальнейшего увеличения их скорости уменьшается в 4 раза. Это объясняется недостатком пропускной способности станции отправления.



Рисунок 5 – График влияния скорости поездов на общее время перевозки

Таким образом, дальнейшее сокращение времени перегруппировки потребует не только изменения скоростного режима движения эшелонов, но и корректировки параметров станций отправления.

Подводя итог вышеизложенному, необходимо отметить, что наиболее эффективным способом решения задачи поиска оптимального варианта организации перевозочного процесса войск (сил) следует признать использование имитационного моделирования. Решение поставленной задачи потребовало систематизации методов разработки имитационных моделей и проведения оценки возможностей современных инструментальных средств имитационного моделирования в интересах материально-технического обеспечения войск (сил).

В практической части работы представлена имитационная модель перевозки общевойскового объединения железнодорожным транспортом при перегруппировке войск, выполненная в среде AnyLogic. Проведенное исследование имитационной модели позволило сформулировать ряд дополнительных рекомендаций для повышения эффективности поддержки принятия решений в интересах должностных лиц органов военного управления.

#### Список использованных источников

1. Калугин Ю.Б., Тупицын Р.Ю. Влияние дестабилизирующих факторов на технологические процессы сооружения мостовых железнодорожных переходов // Наука и военная безопасность. – 2017. – № 1 (8). – С. 123-128.
2. Ложечников Г.А. О научно-методическом аппарате оптимизации решений по применению воинских частей железнодорожных войск в операциях // Военная мысль. – 2007. – № 9. – С. 33-35.
3. Штофф В.А. Моделирование и философия. – М.: Наука, 1966. – С. 299-302.
4. Данков А.А. Моделирование как важнейшая составная часть процесса разработки и модернизации перспективного вооружения. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 76 с.
5. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 212 с.

6. Замятина О.М. Моделирование систем: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 204 с.
7. Мицель А.А. Математическое и имитационное моделирование экономических процессов. – Томск: Изд-во ТГУ, 2016. – 193 с.
8. Антипова С.А. Применение имитационно-игровых алгоритмов при моделировании процессов материально-технического обеспечения войск (сил) / Труды X Общероссийской молодежной научно-технической конфер. «Молодежь. Техника. Космос». Сер. «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ» № 50», 2018. – СПб.: Балтийский государственный технический университет «Военмех», 2018. – С. 14-17.