

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЙСК (СИЛ): ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**

**А.В. Бычков, В.Ю. Батов, М.П. Филяев (Санкт-Петербург)**

### **Введение**

В современных условиях ведения боевых действий организация управления материально-техническим обеспечением (МТО) войск (сил) постоянно усложняется, возрастают объемы анализируемой для принятия решений информации, повышаются требования к их оперативности и своевременности. В связи с этим в последние годы широкое внедрение в систему МТО получили комплексы средств автоматизации. Их применение, безусловно, повышает оперативность управления силами и средствами системы МТО, но в условиях возрастания информационных, психологических нагрузок и высокой динамики изменения ситуации в ходе подготовки и ведения боевых действий не в полной мере обеспечивает эффективную поддержку принятия решений должностными лицами (ДЛ) органов военного управления (ОВУ).

Анализ состояния исследований в рассматриваемой предметной области показал, что основы моделирования и автоматизации управления тылом были разработаны еще на рубеже 70–80-х годов прошлого столетия, предложенные математические модели типовых процессов тылового обеспечения стали основой автоматизации управления в этой области [1]. Однако их применение в современных системах поддержки принятия решений ДЛ ОВУ МТО ограничено, так как разработка подобных систем в настоящее время основывается на применении комплексов математического моделирования, в том числе и имитационного, позволяющих оперативно исследовать различные варианты действий сил и средств и получать прогнозные оценки ожидаемых последствий [2].

Система МТО является сложной организационно-технической системой, объединяющей в своем составе различные по структуре и назначению взаимосвязанные процессы материального, транспортного и технического обеспечения войск (сил). Основным методом исследования процессов функционирования сложных организационно-технических систем является имитационное моделирование [4], поскольку формализованное описание таких процессов на основе аналитических зависимостей фактически невозможно. Этим и была обусловлена актуальность проведения исследований научно-методических основ имитационного моделирования процессов МТО войск (сил).

### **Постановка задачи**

Научные исследования особенностей применения методов имитационного моделирования в новой предметной области – системе материально-технического обеспечения войск, ранее фактически не проводились и были инициированы в 2017 году. Безусловно, при этом возник целый ряд проблемных вопросов, которые в целом можно свести в две группы. Первая из них связана с формированием собственно методологии имитационного моделирования процессов МТО войск (сил), а вторая – с совершенствованием методов разработки и применения имитационных моделей (ИМ) в практике управления силами и средствами МТО [5]. В связи с этим, сформировались два основных направления рассматриваемых научных исследований, структура которых и состав решаемых проблемных задач представлены на рисунке 1.



Рис.1 – Направления исследований научно-методических основ имитационного моделирования процессов МТО войск (сил)

За прошедшее время ряд поставленных задач был успешно решен и накоплен определённый опыт разработки ИМ различных процессов МТО войск (сил). При этом вопросы формирования методологии имитационного моделирования в рассматриваемой предметной области исследуются сотрудниками НИИ (ВСИ МТО ВС РФ) в рамках выполнения ряда научно-исследовательских работ, а методы разработки и применения имитационных моделей – в ходе подготовки и проведения ежегодных специальных учений по МТО ВС РФ.

### **Научные подходы к решению проблемных вопросов имитационного моделирования процессов материально-технического обеспечения войск (сил)**

Научные исследования по применению современных методов математического моделирования в деятельности ОВУ в настоящее время являются основой создания и развития всей системы моделирования ВС РФ. Результаты анализа развития и применения методов имитационного моделирования в управлении процессами функционирования сложных организационно-технических систем военного назначения свидетельствуют о том, что в настоящее время сложились два направления их применения, существенно отличающихся масштабами решаемых задач и технологией разработки имитационных моделей.

Первое направление включает, как правило, разработку и применение ИМ для исследования так называемых «узких мест» при реализации отдельных процессов или их отдельных этапов. Разработка таких моделей в большинстве случаев выполняется на основе применения программных инструментальных сред имитационного моделирования, таких как, например, AnyLogic и GPSS Studio [6, 7]. Создаваемые имитационные приложения при этом носят чисто исследовательский характер и решают частные задачи анализа функционирования сложных организационно-технических систем.

Второе направление применения имитационного моделирования в военной области связано с разработкой и применением программно-аппаратных имитационно-моделирующих комплексов (ИМК), как например, рассмотрено в [8]. Создание ИМК предполагает моделирование функционирования всей организационно-технической системы и позволяет использовать его результаты для поддержки принятия решений

ДЛ ОБУ. Разработка ИМК характеризуется большими финансовыми затратами и выполняется специализированными организациями промышленности на основе применения собственных программных сред и платформ моделирования, фактически не доступных для использования другими специалистами по имитационному моделированию.

Именно эти обстоятельства определили пути решения представленных на рисунке проблемных вопросов, связанные с поиском и разработкой новых подходов в применении относительно доступных современных программных сред моделирования при создании масштабных ИМ различных процессов МТО войск (сил) для их исследования в целом, а не отдельных этапов или частных задач.

Проведённый структурный анализ основных процессов МТО как объектов имитационного моделирования позволил сделать следующие выводы и заключения.

*Во-первых*, разработка ИМ функционирования системы МТО войск (сил) характеризуется повышенной сложностью по сравнению с другими организационно-техническими системами, что обусловлено:

- масштабностью системы, включающей, как минимум 15 основных процессов системного уровня, которые при дальнейшей детализации моделирования декомпозируются более чем в 500 процессов операционного уровня;
- декомпозиция процессов МТО усложнена сильной взаимосвязанностью по общим внутренним ресурсам, включая силы и средства МТО;
- реализация процессов МТО войск (сил) в современных условиях сильно зависима от внешних ресурсов системы;
- при имитационном моделировании требуется всесторонний учет установленных нормативных требований и порядка применения сил и средств.

Классификация уровней детализации моделирования процессов МТО была принята с учётом особенностей, целей и задач их имитационного исследования и рассмотрена в [9]. Суть принятого подхода иллюстрируется на примере детализации уровней моделирования одного из основных процессов ракетно-технического обеспечения – процесса доставки ракет в обеспечиваемые ракетные и зенитные ракетные соединения.



Рис.2 – Уровни детализации процесса доставки ракет

При моделировании процессов на системном уровне осуществляется абстрагирование наиболее существенных характеристик процесса и создание упрощенного модельного отображения на уровне взаимодействия подсистем. Этот уровень детализации характеризуется сравнительно небольшим числом, как правило, усредненных параметров процесса, что обеспечивает возможность его моделирования, в том числе, и аналитическими методами. Результаты моделирования, соответственно, также носят усредненный характер, их уточнение достигается дальнейшей детализацией процесса.

На функциональном уровне проводится моделирование взаимодействия объектов подсистем и выполняемых ими функций в рамках решаемой функциональной задачи с учетом существующих взаимосвязей. Это приводит к существенному возрастанию учитываемых параметров и усложняет их комплексный учет. Выбор метода моделирования в данном случае дополнительно зависит от специфики процесса и может быть как аналитическим, так и имитационным.

Операционный уровень детализации предусматривает моделирование элементов объектов и функциональных операций, выполняемых ими для реализации отдельных функций. Сложность разработки комплексной аналитической модели при этом многократно возрастает ввиду необходимости учета большого числа параметров и определения зависимостей между ними. Имитационное моделирование позволяет решить эту проблему путем определения логики поведения и взаимодействия рассматриваемых элементов объектов и является более предпочтительным методом при операционном уровне детализации.

Существенной модернизацией известных подходов к имитационному моделированию сложных логистических процессов является применение при моделировании различных уровней детализации подпроцессов [9].

Рациональная декомпозиция (разбиение на части, этапы реализации во времени) процесса МТО является определяющим условием построения его модели на основе многоуровневой детализации. При этом в зависимости от формы представления исходных данных и условий постановки задачи одни и те же под процессы могут представляться с различным уровнем детализации.

Применительно к рассмотренной функциональной задаче доставки ракет в ракетные соединения декомпозиция соответствующего процесса может быть выполнена как, например, представлено на рисунке 3.



Рис.3 – Варианты декомпозиции процесса доставки ракет

В первом варианте моделирование этапов подачи ракет из арсенала в техническую ракетную базу (ТРБ) и их транспортирование в пункт передачи на транспорт соединения предполагает функциональный уровень детализации и может быть выполнено по усредненным значениям соответствующих исходных данных, в том числе аналитическим методом. Моделирование этапа выдачи ракет на пусковые установки с учетом их предварительной перегрузки на транспорт соединения предполагает операционный уровень детализации и соответственно разработку ИМ. Очевидно, что данный вариант декомпозиции рассматриваемого процесса соответствует приоритетной задаче исследования временных характеристик функционирования сил и средств ракетного соединения. Второй вариант декомпозиции, наоборот, направлен на исследование временных характеристик функционирования сил и средств ТРБ.

Необходимо отметить, что доминирующей тенденцией сегодня является комплексное применение имитационного моделирования в сочетании с аналитическими моделями (комплексами решаемых информационно-расчётных задач (ИРЗ), что позволяет использовать в исследованиях достоинства обоих методов моделирования). Предложенная многоуровневая форма представления моделей процессов МТО в полной мере обеспечивает возможность реализации данного подхода.

Во-вторых, логистический характер основных процессов МТО войск (сил) предполагает преобладающее применение при имитационном моделировании дискретно-событийного (процессного) подхода, но не исключает при этом и применение других известных методов, включая агентный.

Взаимосвязанные действия сил и средств МТО при решении функциональных задач тылового и технического обеспечения образуют многочисленные процессы, каждый из которых характеризуется начальным и конечным действием и связанными с этим соответствующими событиями. При этом по функциональным признакам действия сил и средств МТО образуют процессы, связанные с логистикой распределения, логистикой склада, логистикой запасов, транспортной логистикой (рисунок 4).

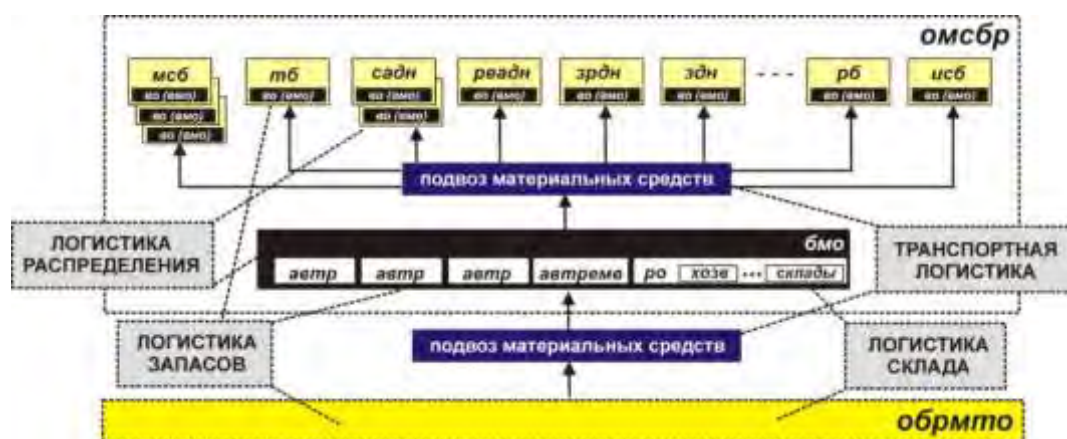


Рис.4 – Сочетание различных видов логистики при организации материально-технического обеспечения мотострелковой бригады

Отличительной особенностью рассматриваемых процессов является комплексный характер логистических признаков [10, 11], что не позволяет однозначно относить эти процессы только к одному из указанных видов логистики. Эта особенность характерна всем звеньям системы МТО и должна учитываться при их взаимодействии.

Для имитационного моделирования процессов МТО, имеющих в большинстве своем логистический характер, наиболее предпочтительно дискретно-событийное моделирование в традиционном его понимании (то есть взгляд на систему как на процесс и задание процесса как последовательности операций) [12]. При этом моделирование действий сил и средств МТО предполагает заранее известное (прогнозируемое) поведение объектов в соответствии с их функциональным назначением.

Моделирование на основе дискретно-событийного подхода имеет различные варианты реализации, которые определяются спецификой моделируемых процессов. С учетом рассмотренных особенностей разработано формализованное описание процесса МТО как объекта имитационного моделирования, которое в наиболее общем виде представлено на рисунке 5 [13].

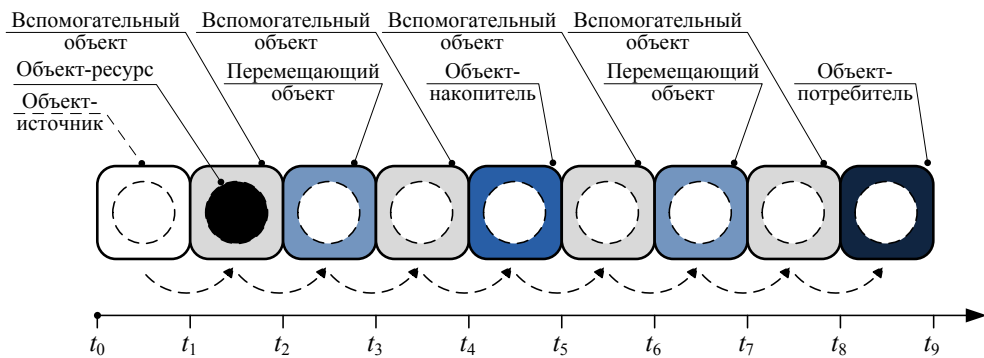


Рис.5 – Абстрактное представление процесса МТО при имитационном моделировании

При выбранном уровне детализации рассматривается взаимодействие двух типов объектов – объектов-ресурсов и объектов-преобразователей. Объект-ресурс может представлять собой материальные, технические и др. виды ресурсов. Например, в качестве объектов-ресурсов могут рассматриваться:

- материальные средства (боеприпасы, ракеты, горючее, продовольствие, вещевое и военно-техническое имущество и т.д.);
- вооружение и военная техника (танки, ракетные и зенитно-ракетные комплексы, артиллерийские установки и т.д.) в период их перевозки различными видами транспорта при передислокации;
- людские ресурсы (воинские формирования различного уровня) в период их перевозки при перегруппировке .

Другим типом объектов, взаимодействующих с объектами-ресурсами и между собой, являются объекты-преобразователи, среди которых можно классифицировать:

- объекты-источники (связаны с возникновением объектов-ресурсов);
- объекты-накопители (хранение объектов-ресурсов);
- перемещающие объекты (перевозка, транспортирование объектов-ресурсов);
- объекты-коммуникации (определяют возможные маршруты перевозки, транспортирования);
- объекты-потребители (связаны с исчезновением объектов-ресурсов);
- вспомогательные объекты (связаны с передачей объекта-ресурса от одного объекта-преобразователя другому).

Посредством объектов-преобразователей осуществляется изменение состояний объектов-ресурсов в моделируемом процессе. В различные периоды моделирования объекты-преобразователи могут выполнять несколько функций.

Следует отметить, что объекты-ресурсы, как правило, являются статическими и для перехода из состояния в состояние требуют применение вспомогательных объектов-преобразователей. Исключением здесь могут служить объекты-ресурсы, представляющие в модели самоходные вооружение и военную технику. Среди объектов-преобразователей динамическими, как правило, являются перемещающие и вспомогательные ресурсы.

Таким образом, на определенном уровне абстрагирования имитационное моделирование процесса МТО сводится к выполнению последовательности функциональных операций объектами-преобразователями над объектами-ресурсами, в результате которых последние перемещаются во времени и пространстве от объектов-источников (либо объектов-накопителей) к объектам-потребителям. При этом правила поведения каждого объекта заранее установлены и могут изменяться только при

возникновении определенных условий, заранее предусмотренных при реализации процесса в установленных границах.

Третьим проблемным вопросом является то обстоятельство, что известные постановки задач и соответствующие им аналитические модели отдельных процессов МТО обеспечивают лишь решение частных ИРЗ в рамках этих процессов, но не позволяют разработать по ним логико-математические модели, являющиеся основой имитационного моделирования.

В условиях неопределенности требований к логико-математическому описанию (ЛМО) моделируемых процессов возникает ряд проблемных вопросов, заключающихся, в первую очередь, в недостаточном понимании непосредственным разработчиком модели сути и специфики исследуемых процессов, описываемых в постановках задач военными специалистами, как правило, текстовым (вербальное описание) или табличным методами (рисунок 6).



Рис.6 – Проблемные вопросы при постановке задачи

Этот проблемный вопрос весьма актуален и не однократно поднимался на ряде совещаний и научных конференций по тематике развития имитационного моделирования в военной сфере. Необходимость его решения обусловлена еще и тем, что в условиях отсутствия специализированной среды моделирования разработка ИМ процессов МТО в настоящее время осуществляется на основе применения универсальных сред моделирования по схеме, представленной на рисунке 7.



Рис.7 – Схема процесса разработки ИМ с использованием универсальной программной среды

В связи с этим предлагается применять для ЛМО процессов МТО интегрированный подход [14] и специализированную нотацию [15]. Суть интегрированного подхода заключается в поэтапном формировании ЛМО процесса с применением при этом различных методов описания (рисунок 8).



Рис.8 – Структура интегрированного метода ЛМО процесса МТО

Пример применения разработанной нотации описания процессов МТО показан на рисунке 9, где представлен фрагмент описания одного из моделируемых процессов.

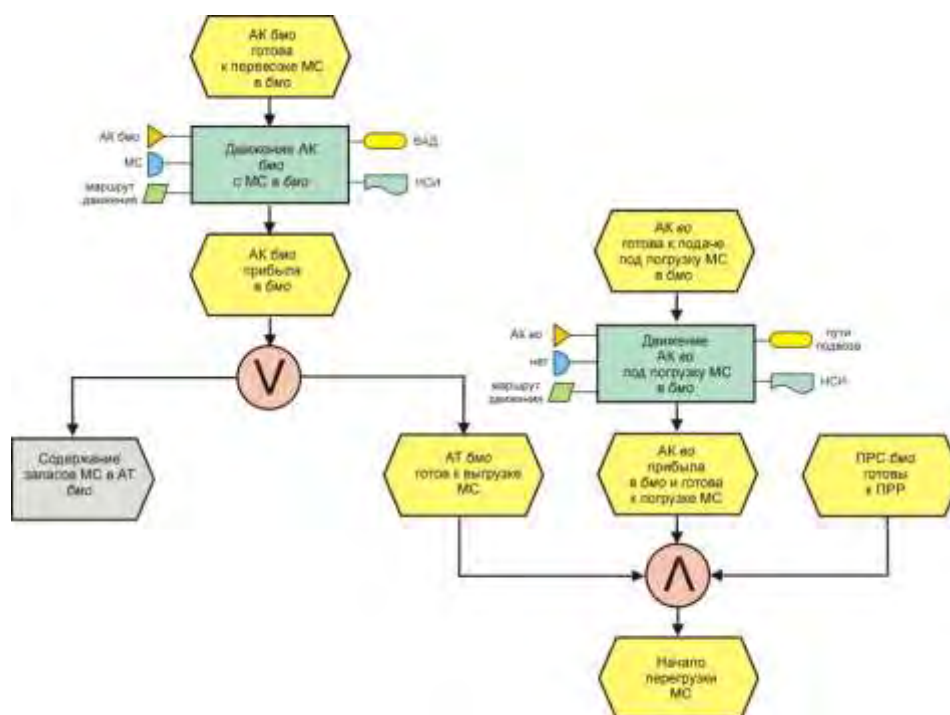


Рис.9 – Пример применения нотации для описания процесса МТО

Ключевым элементом в рассматриваемой нотации является блок «действие» (рисунок 10), а все описание процесса при этом представляет собой событийную цепочку действий. Предложенный в нотации состав описания действий содержит достаточную для разработчика ИМ информацию о его сути и особенностях реализации.



Рис.10 – Состав описания блока «действие»

Рассматриваемый подход успешно апробирован при разработке ряда ИМ процессов МТО войск (сил) и может быть при необходимости усовершенствован.

*Четвертый* проблемный вопрос имитационного моделирования процессов МТО в условиях применения для разработки ИМ универсальных программных сред заключается в необходимости проведения имитационных исследований однотипных процессов в различных условиях оперативной обстановки. Для его решения предложен подход, заключающийся в разработке специализированных инструментальных средств моделирования типовых процессов МТО, что обеспечивает достаточную модификацию ИМ без привлечения ее разработчика. В основе реализации данного подхода лежит организация ввода всех исходных данных ИМ через внешний интерфейс программной среды моделирования, что обеспечивается возможностью обработки XLS-файлов в данной среде. Эта возможность реализована как в AnyLogic, так и в GPSS Studio. Соответственно, логико-математическая модель исследуемого процесса может быть реализована в любой из указанных программных сред [16].

Схема реализации рассмотренного подхода представлена на рисунке 11.





Рис.11 – Технология создания специализированного инструментального средства имитационного моделирования логистического процесса МТО

Технология создания специализированных инструментальных средств имитационного моделирования процессов МТО была успешно применена при разработке ИМ ряда процессов МТО войск (сил) в программной среде AnyLogic, представленных в [17, 18, 19].

### Заключение

Имитационные исследования процессов МТО войск (сил) в настоящее время основаны на применении современных универсальных программных сред имитационного моделирования. Сложность и масштабность моделируемых процессов обусловили ряд проблемных вопросов, возникающих при разработке ИМ этих процессов, что в свою очередь инициировало поиск новых путей и подходов, всесторонне учитывающих особенности имитационного моделирования процессов МТО войск (сил). Созданный в настоящий момент научно-методический задел и приобретённый опыт разработки ИМ обеспечивают дальнейшее развитие и применение имитационного моделирования в деятельности ДЛ ОВУ МТО, а также вносят весомый вклад в теорию и практику разработки компонентов МТО перспективных ИМК военного назначения.

### Литература

1. **Голушко И.М., Варламов Н.В.** Основы моделирования и автоматизации управления тылом. – М.: Воениздат, 1982. – 237 с.
2. **Башмаков А.И., Башмаков И.А.** Интеллектуальные информационные технологии: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 304 с.
3. **Тиханычев О.В.** Субъективные аспекты применения математического моделирования военных действий в работе органов военного управления // Военная мысль №10 – 2011. – С. 49-53.
4. **Аксенов К.А.** Моделирование и принятие решений в организационно-технических системах: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1 / К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова. – Екатеринбург: Изд-во Урал.ун-та, 2015. – 104 с.
5. **Бычков А.В., Воробьев А.А., Левченко Г.Н., Филяев М.П.** Научно-методические подходы к имитационному моделированию процессов материально-технического обеспечения войск (сил) в операциях (боевых действиях) / Сб. трудов Межведомственной научно-технической конференции «Актуальные проблемы применения имитационного моделирования в интересах материально-технического обеспечения ВС РФ». – СПб: ВА МТО, 2018 – С.21-34.

- 
6. AnyLogic. Многоподходное имитационное моделирование. [Электронный ресурс]. – <http://www.anylogic.ru> (дата обращения: 10.11.2020).
  7. **Девятков В.В., Девятков Т.В., Федотов М.В.** Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO: учебное пособие / под общей редакцией В. В. Девяткова. – М.: Вузовский учеб.: ИНФРА-М, 2018. – 281 с.
  8. **Богданов О.А., Смирнов А.А., Ковалев Д.В.** Имитационное моделирование противоборства в воздушно-космической сфере / Программные продукты и системы. 2016. № 1. – С.160-165.
  9. **Филяев М.П., Воробьев А.А.** Актуальные вопросы имитационно-аналитического моделирования логистических процессов ракетно-технического обеспечения / В сборнике: Восьмые Уткинские чтения. Труды Общероссийской научно-технической конференции. Сер. «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ»». 2019 – С. 290-296.
  10. **Галяутдинов Р.Р.** Виды логистики и их характеристика // Сайт преподавателя экономики. [2016]. URL: <http://galyautdinov.ru/post/vidy-logistiki> (10.11.2020).
  11. **Стерлигов А.К.** Использование метода имитационного моделирования в прикладных логистических задачах / Логистика сегодня. 2006. № 1. – С. 40-48.
  12. **Дигрис А.В.** Дискретно-событийное моделирование: курс лек. Минск: БГУ, 2011.
  13. **Воробьев А.А., Филяев М.П., Якшин А.С.** Дискретно-событийное имитационное моделирование процессов материально-технического обеспечения войск (сил) / Наука и военная безопасность. – Омск: ОАБИИ, вып.1 (16), 2019 – С. 76-82.
  14. **Филяев М.П.** Интегрированный подход к формализации логистического процесса // В сборнике: Теоретические и концептуальные проблемы логистики и управление цепями поставок. Сборник статей II Международной научно-практической конференции (20-21 июня 2020 г.) – Пенза: ПГАУ – С. 82-86.
  15. **Филяев М.П.** Формализация логистического процесса на основе построения его диаграммы // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. 2020. № 2 (16). С. 81-91.
  16. **Филяев М.П., Воробьев А.А.** Технология создания специализированных инструментальных средств имитационного моделирования логистических процессов / В сборнике: Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. Труды конференции. 2019. – С. 580-586.
  17. **Манузин Д.Н., Филяев М.П., Чернышев С.А.** Имитационная модель обеспечения горючим группировки войск (сил) на стратегическом направлении / Сборник научных статей по материалам отраслевой научно-практической конференции «Проблемные вопросы МТО ВС РФ и пути их решения (по итогам исследований на мероприятиях оперативной и боевой подготовки войск (сил) в 2019 году)» – СПб: ВА МТО, 2019. – Часть 1. – С. 77-86.
  18. **Антипова С.А., Волков М.Н., Филяев М.П., Якшин А.С.** Имитационная модель перевозки войск железнодорожным транспортом / Свид-во о регистр. программы для ЭВМ RU 2019612378, 19.02.2019. Заявка № 2019611158 от 08.02.2019.
  19. **Антипова С.А., Волков М.Н., Филяев М.П., Якшин А.С.** Имитационная модель временного перегрузочного района / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019617381, 06.06.2019. Заявка № 2019615841 от 21.05.2019.