

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ ДИНАМИКИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В МОРСКОМ ПОРТУ

А. Н. Павлов, Д. А. Иванов, Д. А. Павлов, А. А. Слинько (Санкт-Петербург)

## Введение

Вопросы эффективного управления цепями поставок является чрезвычайно важным для функционирования промышленных, логистических и торговых предприятий. Всю совокупность решений, принимаемых при управлении цепями поставок, можно разделить на уровни: конфигурирования цепи поставок (стратегия); планирования реализации процессов в цепи поставок (тактика) и оперативного управления цепью поставок. В рамках управления цепями поставок решаются две группы задач: задачи кооперации и координации, которые в совокупности образуют задачу взаимодействия. Именно взаимодействие является ключевой категорией в управлении цепями поставок. В статье рассматриваются вопросы планирования информационного взаимодействия цепи поставок на примере планирования выполнения логистических операций в морском порту. Известно, что цепи поставок не могут быть эффективными, если их рассматривать с прежних позиций планирования и оперативного управления логистикой и производством. В связи с этим управление логистическими операциями в морском порту связано с развитием новых схем взаимодействия его элементов (узлов) между собой, позволяющих достигать наибольшей эффективности функционирования порта.

## 1. Анализ выполнения логистических операций в морском порту

Современный мир насчитывает более 3000 морских портов. Являясь важнейшим инфраструктурным объектом, порт может быть «бутылочным горлышком» как для экспортеров, так и для импортеров, именно поэтому развитие портов является основным приоритетом крупнейших стран, а в последнее время в мультинациональных корпорациях, постоянно осуществляется моделирование, разрабатываются и внедряются эффективные модели управления работой морского порта. В статье управление логистическими операциями в типовом морском порту рассматривается в рамках системного подхода к гибкому планированию и управлению всеми потоками товаров, поступающих в порт от поставщика или производителей, сортируемых на его узлах для последующей отправки до конечного потребителя. Целью планирования является максимизация объема доставленных до потребителя товаров с учетом вводимых ограничений. Однако необходимо учитывать, что транспортно-логистическая структура (ТЛС) морского порта характеризуется структурной динамикой, вызванной различными возмущающими факторами (рисунок 1).

На рисунке 1 зеленые круги характеризуют узла порта (причалы) предназначенные для хранения поступивших товарных потоков и оранжевые круги для сортировки и передачи товарных потоков, а серые круги (площадки) для хранения отсортированных товарных потоков. Оранжевые круги отражают процесс сортировки товаров на узле порта, который характеризуется интенсивностью  $\omega_{ip}$  сортировки товаров. В узлы порта 1 и 2 поступают объемы  $V_{po}$  товарных потоков  $p$ -х типов, которые должны быть отсортированы и доставлены до потребителя (на площадку отсортированных товаров для вывоза на автомобилях или железнодорожном составе), при этом серые круги характеризуются интенсивностью  $\omega_{id}$  передачи отсортированных товарных потоков.

Один из вариантов (сценариев) структурной реконфигурации логистических операций в морском порту представлен на рисунке 1.

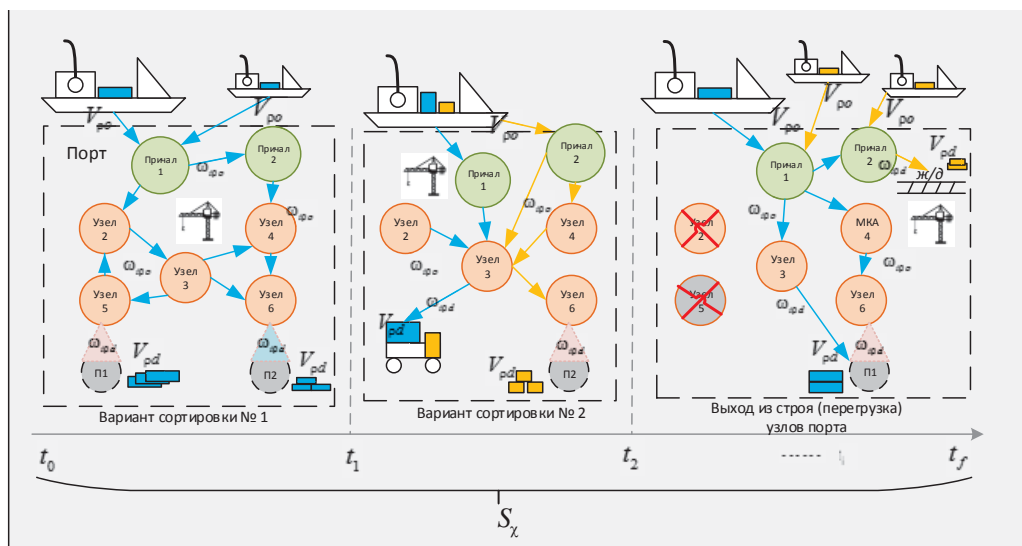


Рис. 1. Динамика ТЛС морского порта

При этом каждый вариант динамики ТЛС морского порта  $S_\chi$  характеризуется набором ее структурных состояний  $\{St_{i_1, i_2, \dots, i_k}^\chi\}$ , смена которых происходит на промежутке времени  $T = (t_0, t_f]$ . В рамках статьи будем полагать, что заданный интервал времени  $T = (t_0, t_f]$  структурной динамики разбит на некоторое число  $L_\chi$  подынтервалов  $T = \{(t_0, t_1], (t_1, t_2], \dots, (t_{k-1}, t_k], \dots, (t_{L_\chi-1}, t_{L_\chi} = t_f)\}$  постоянства ТЛС морского порта. В каждом подынтервале  $T_k = (t_{k-1}, t_k]$  ТЛС находится в неизменном состоянии  $St_{i_1, i_2, \dots, i_k}^\chi$ . Тогда задача планирования выполнения логистических операций в морском порту при  $S_\chi$  динамике ТЛС заключается в определении оптимального решения  $u^*$  (оптимального плана распределения потоков) для  $S_\chi$ .

## 2. Математическая модель планирования логистических операций в порту

План  $U$  выполнения логистических операций в морском порту можно обобщенно представить вектором, состоящим из пяти подвекторов  $x, y, g, z, r$ , следующим образом [4, 5]:

$$U = \|x, g, y, z, r\| = \left\| \|x_{ij\rho dk}\|, \|g_{i\rho ok}\|, \|y_{i\rho k}\|, \|z_{i\rho k}\|, \|r_{i\rho k}\| \right\|, \quad (1)$$

где  $\|x_{ij\rho dk}\|$  – вектор, характеризующий объемы переданных потоков товаров  $\rho$ -х типов (при  $\rho \neq \rho_0$ ) с  $i$ -х на  $j$ -е логистические узлы порта по  $d$ -м технологиям на  $k$ -х интервалах постоянства ТЛС, и объемы эксплуатационных затрат на осуществление данных операций (при  $\rho = \rho_0$ );

$\|g_{i\rho ok}\|$  – вектор, характеризующий объемы потоков товаров  $\rho$ -х типов, сортируемых (в случае, когда  $o \in O_{\rho\text{вых}}$ ) или поступающих в порт для дальнейшей сортировки (в случае, когда  $o \in O_{\rho\text{вх}}$ )  $i$ -ми узлами по  $\theta$ -м технологиям на

$k$ -х интервалах (при  $\rho \neq \rho_0$ ), и объемы эксплуатационных затрат на осуществление данной сортировки (при  $\rho = \rho_0$ );

$\|y_{ipk}\|$  – вектор, характеризующий объемы складированных потоков товаров  $\rho$ -х типов  $i$ -ми узлами на  $k$ -х интервалах, при  $\rho \neq \rho_0$ , а при  $\rho = \rho_0$  – объемы эксплуатационных ресурсов (ЭР), оставшихся на  $i$ -х узлах на  $k$ -х интервалах;

$\|z_{ipk}\|$  – вектор, характеризующий объемы избыточных потоков товаров  $\rho$ -х типов на  $i$ -х узлах на  $k$ -х интервалах (при  $\rho \neq \rho_0$  – избыточных потоков товаров, а при  $\rho = \rho_0$  – неиспользованных ЭР);

$\|r_{ipk}\|$  – вектор, характеризующий результирующие объемы доставленных  $i$ -ми узлами до потребителя товаров  $\rho$ -х типов на  $k$ -х интервалах (при условии  $\rho \neq \rho_0$ ).

При формировании плана осуществления логистических операций в морском порту поиск наилучшего решения может осуществляться посредством оптимизации следующих обобщенных показателей ресурсно-логистических возможностей порта:

$H_1 = \sum_{k \in K} \sum_{\rho \in P} \sum_{i \in N} r_{ipk}$  – показатель объема товаров, доставленных до потребителя в результате выполнения целевой задачи порта;

$H_2 = \sum_{\rho \in P} \sum_{i \in N} z_{ipw}$  – показатель объема избыточных (неиспользованных) товаров и ЭР за время выполнения целевой задачи порта.

В соответствии с данными показателями введены следующие критериальные функции:

$$H_1 = \sum_{k \in K} \sum_{\rho \in P} \sum_{i \in N} r_{ipk} \rightarrow \max, \quad H_2 = \sum_{\rho \in P} \sum_{i \in N} z_{ipw} \rightarrow \min, \quad (2)$$

Тогда на множестве допустимых планов выполнения логистических операций в морском порту  $\Delta_\beta$  при его структурной динамике  $S_\chi$  осуществляется выбор рациональных планов  $U \subseteq \Delta_\beta$  в соответствии с критериями ( $H_1(U) \rightarrow \max, H_2(U) \rightarrow \max$ ).

В свою очередь область допустимых планов выполнения логистических операций в морском порту  $\Delta_\beta$  задается рядом ограничений.

Технологические ограничения, накладываемые на выполнения логистических операций в морском порту представим ниже:

– ограничение баланса товарных потоков:

$$\left( \sum_{d \in D_{\rho vx}} \sum_{j \in J_{\rho vx}} x_{ij\rho dk} - \sum_{d \in D_{\rho vx}} \sum_{j \in J_{\rho vx}} x_{ij\rho dk} \right) + (y_{ipk} - y_{ip(k-1)}) + \left( \sum_{o \in O_{\rho vx}} g_{ipok} - \sum_{o \in O_{\rho vx}} g_{ipok} \right) + z_{ipk} + \chi_{ipk} r_{ipk} = I_{ipk} \quad \forall k \in K, \rho \in P \setminus \{p_0\} \quad (3)$$

где  $D_{\rho vx}, D_{\rho vvx}$  – множества технологий передачи товаров;

$O_{\rho vx}, O_{\rho vvx}$  – множества технологий сортировки товаров;

$X = \{\chi_{ipk}\}, \chi_{ipk} \in \{0;1\}$  – коэффициент, характеризующий возможность передачи потребителю потоков товаров  $\rho$ -го типа  $i$ -м узлом на  $k$ -м интервале;

$I_{ipk}$  – объем поступающих с прибывших в порт кораблей потоков товаров  $\rho$ -го типа на  $i$ -е узлы на  $k$ -х интервалах.

– ограничение баланса ЭР:

$$\sum_{d \in D_{\rho \text{вых}}} \sum_{j \in J_{\text{вх}}} x_{ijdk} + (y_{ipk} - y_{i\rho(k-1)}) + \sum_{o \in O_{\rho \text{вх}}} g_{i\rho ok} + z_{ipk} = I_{ipk}, \forall k \in K; \rho = \rho_0 \quad (4)$$

где  $x_{ijdk}$  – объем ЭР, затраченных на реализацию  $d$ -й технологии передачи товаров с  $i$ -го на  $j$ -й узел на  $k$ -м интервале,

$y_{ipk}$  – объем оставшихся ЭР на  $i$ -м узле на  $k$ -м интервале,

$g_{i\rho ok}$  – объем эксплуатационных затрат на использование  $o$ -й технологии сортировки потоков товаров  $\rho$ -го типа  $i$ -м узлом на  $k$ -м интервале,

$z_{ipk}$  – объем ЭР, поступивший на  $i$ -й узел и не использованный им на  $k$ -м интервале,

$I_{ipk}$  – объем получаемых из вне ЭР  $i$ -м узлом на  $k$ -м интервале.

– ограничение на сортировку товарных потоков:

$$t_{io k}^s \cdot V_{\rho o} - g_{i\rho ok} \cdot T_o = 0, \forall k, i, o; \quad (5)$$

где  $T_o$  – тактовое время (время, за которое объем товарных потоков  $\rho$ -го типа  $V_{\rho o}$  сортируется согласно  $o$ -й технологии),

$t_{io k}^s$  – время сортировки товарного потока  $i$ -м узлом по  $o$ -й технологии на  $k$ -м интервале,

– ограничение на передачу товарных потоков:

$$t_{ijdk}^x \cdot V_{\rho d} - x_{ijdk} \cdot T_d = 0, \forall k, i, d; \quad (6)$$

где  $t_{ijdk}^x$  – время передачи товарных потоков с  $i$ -го на  $j$ -й узел по  $d$ -й технологии;

$T_d$  – тактовое время (время, за которое объем товарных потоков  $\rho$ -го типа  $V_{\rho o}$  передается согласно  $d$ -й технологии).

Технические ограничения, на выполнения логистических операций в порту:

– на хранение товарных потоков:

$$\sum_{\rho \in P} y_{ipk} \leq Y_i; \forall i, k \quad (7)$$

где  $y_{ipk}$  – объем складированных потоков товаров  $\rho$ -го типа на  $i$ -м узле (складе порта),

$Y_i$  – объем склада  $i$ -го узла порта.

– на объем эксплуатационных затрат:

$$y_{ipk} \leq E_i; \forall i, k; \rho = \rho_0 \quad (8)$$

$E_i$  – общий объем эксплуатационных затрат на  $i$ -м узле.

Временные ограничения, на выполнения логистических операций в морском порту:

– на сортировку товарных потоков:

$$\sum_{o \in O} t_{iok}^g \leq T_k; \forall i, k \quad (9)$$

где  $T_k$  - длительность  $k$ -го интервала постоянства.

– на передачу товарных потоков:

$$\sum_{d \in D_{\text{првх}}} \sum_{j \in J_{\text{лвх}}} t_{ijpk}^x + \sum_{d \in D_{\text{лвх}}} \sum_{j \in J_{\text{првх}}} t_{jik}^x \leq T_k; \forall i, k; \rho \in P \setminus \{p_0\} \quad (10)$$

Таким образом, задачу планирования выполнения логистических операций в морском порту опишем следующим образом: необходимо найти такой план  $u^*$  выполнения логистических операций из множества допустимых планов  $\Delta_B$  с учетом отношений, ограничивающих выбор, формализованных в выражениях (1-10), при котором достигаются экстремальные значения показателей  $H_1(U) \rightarrow \max, H_2(U) \rightarrow \min$ .

### 3. Результаты проведенных экспериментов

Проведенные исследования позволили подойти к вопросу оптимального формирования режимов работы узлов морского порта. В рамках статьи по условиям задачи были рассмотрены три режима функционирования узлов морского порта: LOW-режим (низкая интенсивность работ в узлах); HIGH-режим (высокая интенсивность работ в узлах); FLEX-режим (комбинированный режим работ в узлах).

При этом рассматривались три вида вещественных потоков, циркулирующих в морском порту. Товары, прибывшие на кораблях в морской порт поступают в приемные узлы в контейнерах и могут быть отправлены после его разгрузки и погрузки на ж/д транспорт для отправки потребителю, при этом они образуют «сырьевой» поток; товары, выгруженные из прибывших морских контейнеров могут быть отсортированы для непосредственного вывоза в виде отдельной продукции, образуя поток «продукция»; продукция, отсортированная и загруженная в авто контейнер для последующей доставки потребителю на автомобильном транспорте, образует поток типа «авто продукция». Планирование работы узлов морского порта проводилось на основе пяти интервалов постоянства его транспортно-логистической структуры. Интервалы постоянства в своей совокупности отражают структурную динамику (в статической постановке) транспортно-логистической структуры. Результаты планирования работы узлов морского порта с учетом данной структурной динамики представлены на рисунке 2.

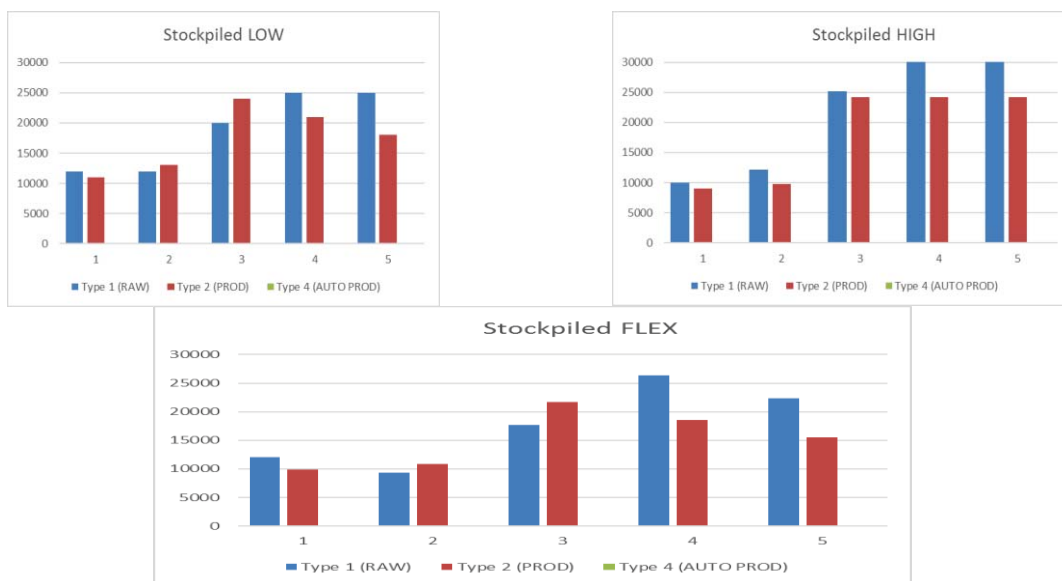


Рис. 2. Графики складированных потоков товаров в пяти интервалах постоянства

На рисунке 2 представлена часть полученных результатов планирования работы узлов порта, которая касается складированных потоков товаров при различных режимах работы узлов на пяти интервалах постоянства транспортно-логистической структуры порта. На графиках видно, что при работе узлов во FLEX-режиме на всех пяти интервалах постоянства остаточный объем складированных потоков товаров меньше, чем в двух других режимах. На рисунке 3 представлены результаты по объемам переданной потребителю товаров в виде трех потоков, описанных выше.

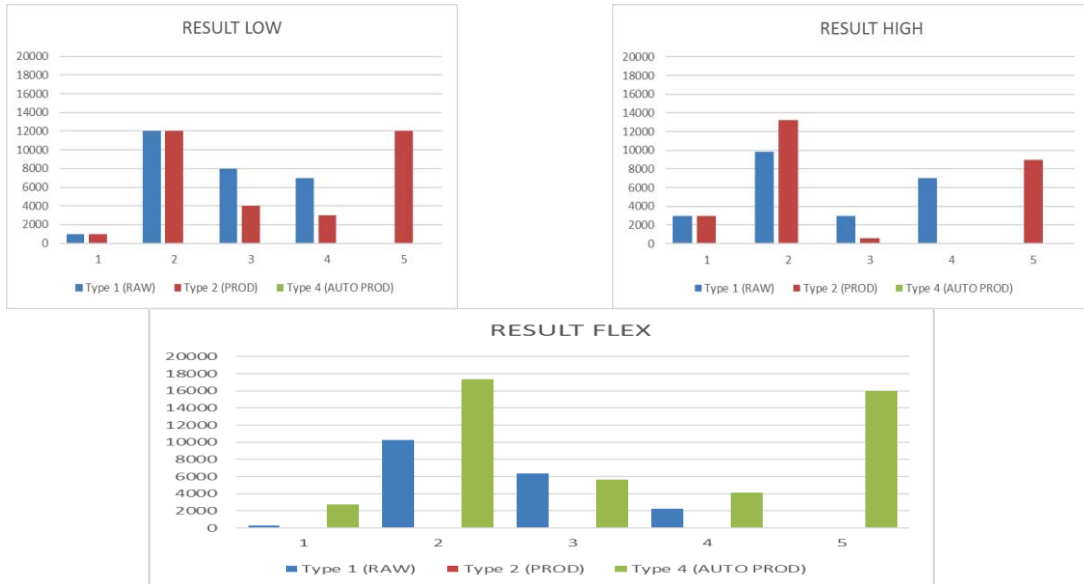


Рис. 3. Графики переданных потоков товаров потребителям

В соответствии с полученными результатами планирования работы узлов порта можно сделать вывод о том, что в FLEX-режиме работы узлов ресурсы порта направлены на передачу потоков товаров типа «AUTO PROD» потребителям. По условиям задачи данный поток является наиболее важным для заказчика и потребителей товаров. Также в ходе исследований был проведен сравнительный анализ эксплуатационных затрат при различных режимах работы узлов морского порта (рисунок 4).

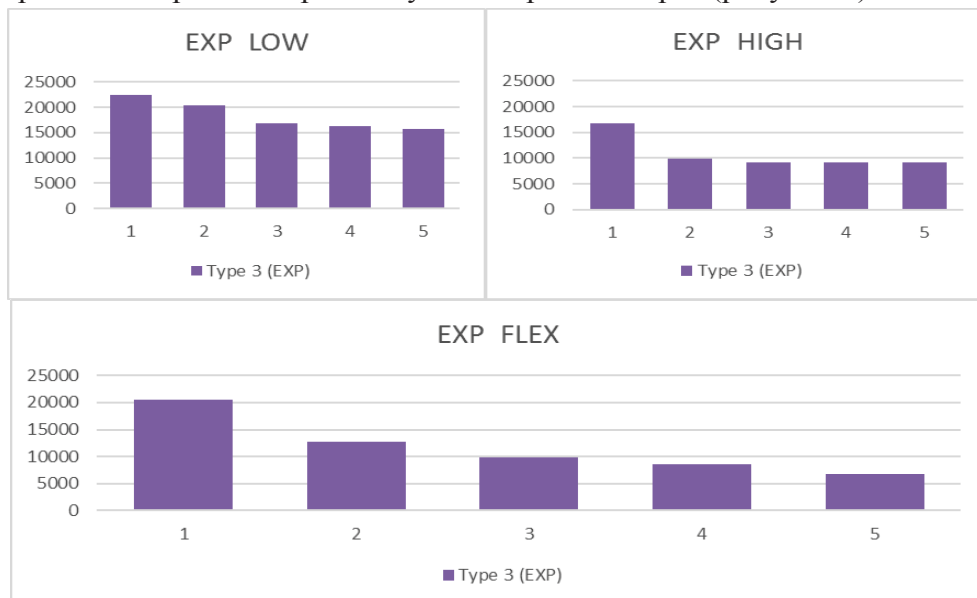


Рис. 4. Графики эксплуатационных затрат узлов порта

На рисунке 4 видно, что оставшиеся эксплуатационные ресурсы на узлах порта при FLEX-режиме функционирования характеризуются меньшим объемом, чем при



HIGH-режиме работы узлов. Обобщая результаты планирования по трем направлениям (складирование, передача потоков товаров трех типов и расход эксплуатационных ресурсов) можно сделать вывод о том, что FLEX-режим работы узлов является наиболее эффективным при выполнении целевых задач порта. В данном режиме ресурсы, заложенные в транспортно-логистическую систему порта, используются наиболее полно, и при этом достигается наилучший с точки зрения заданных критериев важности целевой результат, т.е. потребители получают наибольшие объемы товаров в желаемом виде.

### Заключение

На основе полученных результатов планирования работы узлов морского порта в рамках статьи был предложен подход к формированию гибкого (FLEX) режима функционирования узлов порта. Это комбинированный режим функционирования основанный на выборе оптимальных в соответствии с прогнозируемой обстановкой технологий выполнения целевых и обеспечивающих функций морского порта с различной степенью эксплуатационных затрат. Данный режим позволяет наиболее полно реализовать потенциальные возможности морского порта и использовать его структурно-функциональную избыточность. Это, в свою очередь, позволяет добиться наилучших результатов целевого функционирования узлов порта, т.е. повысить эффективность работы порта в целом за счет оптимального распределения операций и расходования эксплуатационных ресурсов его транспортно-логистической структуры. Таким образом, можно предположить, что использованная при расчетах модель планирования в условиях прогнозируемой динамики транспортно-логистической структуры морского порта позволяет рационально использовать эксплуатационные ресурсы узлов согласно вводимым в модель согласующим коэффициентам важности товарных потоков.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПб ГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074-U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг-СГ» (проект 1.4.1-1), грантов РФФИ (№№15-07-08391, 15-08-08459, 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 16-29-09482-офи-м, 16-07-00925, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139, 17-20-01214), госзадания Министерства образования и науки РФ №2.3135.2017/4.6, в рамках бюджетных тем №№0073-2014-0009, 0073-2015-0007, Международного проекта ERASMUS +, Capacity building in higher education, № 73751-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP, Новые стратегии обучения инженеров с использованием сред визуального моделирования и открытых учебных платформ.

### Литература

1. **Ivanov D., Sokolov B.** Adaptive Supply Chain Management. London: Springer, 2010. 269 p.
2. **Воронов В. И.** Имитационная модель управления работой морского порта // Вестник Самарского Государственного Университета им. академика С. П. Королева (НИУ) 2005 № 1(7) с. 42–451.
3. **Пономарёв Н. Е.** Морская логистика и особенности морских перевозок // Молодой ученый. – 2016. – №1. – С. 464–466.
4. Модель планирования операций устойчивого информационного взаимодействия кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / Павлов А. Н., Слинько А. А., Павлов Д. А., Павлов А. А. // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, Вып. № 654, 2016. – С. 8–13.
5. Подход к исследованию структурно-функциональной реконфигурации системы управления движением космического аппарата / Павлов А. Н., Григорьев К. Л., Осипенко С. А., Слинько А. А., Кулаков А. Ю. // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, Вып. № 655, 2016. – С. 17–23.