ПОРТЫ, ПОРТОВОЕ ХОЗЯЙСТВО И ТРАНСПОРТНАЯ ЛОГИСТИКА

УДК 656.027

О. А. Изотов, Д. Л. Головцов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Рассматриваются транспортные системы, организованные по принципу «многие-ко-многим», т. е. системы, в которых грузопотоки из нескольких пунктов отправления должны быть доставлены в несколько пунктов назначения. Одной из форм повышения эффективности организации таких перевозок является концентрация грузопотоков на территории промышленно-отгрузочного терминала с последующей доставкой грузов в пункты назначения. В таких транспортных системах при организации транспортных потоков и управлении ими применяют три основные стратегии: каждый пункт отправления/получения может быть прикреплён только к одному терминалу, каждый пункт отправления/получения может взаимодействовать сразу с несколькими терминалами, каждый пункт отправления/получения может взаимодействовать с другими пунктами напрямую. Для каждой стратегии приведены соответствующие математические модели. Целевая функция в данных математических моделях минимизирует суммарные транспортные расходы, в которых стоимость транспортировки грузовой единицы между пунктами отправления/получения представляется в виде суммы стоимостей между пунктами отправления/получения и промышленно-отгрузочными терминалами, а также между самими промышленно-отгрузочными терминалами. Стоимость транспортировки грузовой единицы между промышленно-отгрузочными терминалами меньше, чем при транспортировке грузов между пунктами отправления/получения и промышленно-отгрузочными терминалами за счёт влияния эффекта масштаба. Проведены расчёты, определяющие влияние коэффициента эффекта масштаба на суммарные транспортные расходы по доставке грузов в зависимости от выбранной модели доставки. Расчёты проводились для 8, 10, и 12 пунктов отправления/получения с фиксированным количеством промышленно-отгрузочных терминалов, суммарные издержки рассчитывались при изменении коэффициента эффекта масштаба от 0 до 1 с интервалом 0,1. Количество груза и стоимость грузовой единицы задавались случайными значениями на определённом интервале. Рассматриваемые математические модели были рассчитаны в интегрированной среде разработки MATLAB с использованием оптимизационного пакета CPLEX.

Ключевые слова: распределение «многие-ко-многим», транспортная инфраструктура «ступица-и-спица», целочисленное программирование, эффект масштаба, промышленно-отгрузочный терминал.

Введение

Вопросы, связанные с необходимостью промышленного освоения северных регионов, обусловлены одной из насущных проблем современности – невозобновляемостью природных ресурсов, таких как газ и нефть, нарастанием потребности в сырье и топливе. Нефть и газ обеспечивают большую долю внутреннего валового продукта России, они являются главными статьями экспорта страны. Однако основные месторождения на суше уже частично выработаны, а в Татарстане и Западной Сибири истощены. Основные энергетические и сырьевые запасы России оказались сосредоточены в высоких широтах, на шельфе Северного Ледовитого океана содержится четверть запасов нефти и половина запасов газа.

Однако процесс освоения таких месторождений, как Штокмановское газоконденсатное в Баренцевом море, в настоящее время требует современных подходов и решений [1–4].

Для эффективного функционирования планируемых нефтегазовых комплексов необходимо решить целый ряд задач, ключевой из которых можно считать инфраструктурное обеспечение морских нефтегазовых проектов, т. е. создание и размещение на прибрежной территории по всей протяжённости шельфовых месторождений промышленных и технологических объектов, образующих взаимосвязанную технико-технологическую и транспортную систему и обеспечивающих снабжение строительными материалами, техникой, оборудованием, металлоконструкциями, горючесмазочными материалами, химическими реагентами, трубами и кабелями месторождений побережья, а также шельфовых нефтегазовых проектов.

Материалы и методы исследования

Одной из форм повышения эффективности организации мультимодальных перевозок является концентрация грузопотоков на территории промышленно-отгрузочного терминала (ПОТ) с последующей доставкой грузов в пункты назначения. Такая инфраструктура транспортной сети известна под названием «ступица-и-спица» (Hub-and-Spoke Network) [5–6].

Транспортная сеть сосредоточивает грузопотоки между ПОТ, и оптимизация таких показателей, как коэффициент эффекта масштаба, количество связей между поставщиками и потребителями, численность парка транспортных средств для регулярного обслуживания во всех направлениях являются существенным стимулом при планировании и организации маршрутов в этих системах.

В реальных транспортных системах, организованных по принципу «многие-ко-многим» при управлении транспортными потоками применяют три основные стратегии (рис. 1) [7]):

1. Каждый пункт (узел) отправления/получения может быть прикреплён только к одному ПОТ.
2. Каждый узел отправления/получения может взаимодействовать сразу с несколькими ПОТ.
3. Каждый узел отправления/получения может взаимодействовать с другими пунктами напрямую.

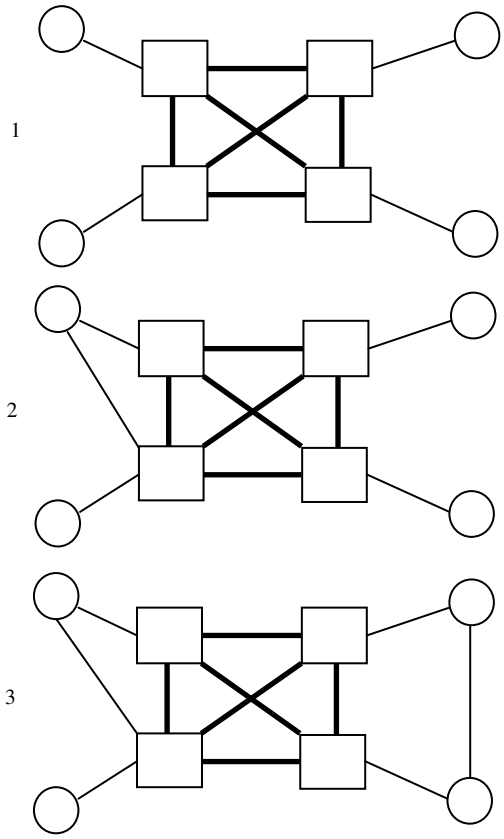


Рис. 1. Стратегии управления транспортными потоками в сети:
○ – узел отправления/получения; □ – промышленно-отгрузочный терминал;
1, 2, 3 – стратегии управления транспортными потоками

Математические модели организации транспортных потоков в сети

Модель	Целевая функция	Ограничения
Модель 1	$F_1 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\sum_{m=1}^{n} W_{ij} x_{ijkm} c_{ijkm} \to \min$	$\sum_{k=1}^{n} x_{kk} = p$ $\sum_{k=1}^{n} x_{ik} = 1 \ \forall\ i$ $x_{ik} \le x_{kk} \ \forall\ i,\ k,\ i \ne k$ $\sum_{m=1}^{n} x_{ijkm} = x_{ik} \ \forall\ i,\ j,\ k$ $\sum_{k=1}^{n} x_{ijkm} = x_{jm} \ \forall\ i,\ j,\ m$ $x_{ik},\ x_{ijkm} \in \{0,\ 1\} \ \forall\ i,\ j,\ m,\ k$
Модель 2	$F_2 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\sum_{m=1}^{n} W_{ij} x_{ijkm} c_{ijkm} \to \min$	$\sum_{k=1}^{n} x_{kk} = p$ $\sum_{k=1}^{n}\sum_{m=1}^{n} x_{ijkm} = 1 \ \forall\ i,\ j$ $\sum_{m=1}^{n} x_{ijkm} \le x_{kk} \ \forall\ i,\ j,\ k$ $\sum_{k=1}^{n} x_{ijkm} \le x_{mm} \ \forall\ i,\ j,\ m$ $x_{ik},\ x_{ijkm} \in \{0,\ 1\} \ \forall\ i,\ j,\ m,\ k$
Модель 3	$F_3 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\sum_{m=1}^{n} W_{ij} x_{ijkm} c_{ijkm} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} W_{ij} x_{ij} c_{ij} \to \min$	$\sum_{k=1}^{n}\sum_{m=1}^{n} x_{ijkm} + x_{ij} = 1 \ \forall\ i,\ j$ Остальные ограничения аналогичны ограничениям для модели 2.

В таблице представлены математические модели целочисленного программирования для схем транспортных сетей, показанных на рис. 1 [8–10], где W_{ij} – количество груза, которое необходимо доставить из пункта i в пункт j; $x_{ik} = 1$, если транспортировка груза осуществляется между узлом i и ПОТ, размещённым в узле k, в противном случае (транспортировка груза не осуществляется между узлом i и ПОТ) $x_{ik} = 0$; $x_{kk} = 1$, если ПОТ размещён в узле k, в противном случае $x_{kk} = 0$; $x_{ijkm} = 1$, если соединение между узлом i и узлом j осуществляется через ПОТ k и m, в противном случае $x_{ijkm} = 0$; p – количество размещённых ПОТ; c_{ijkm} – стоимость транспортировки грузовой единицы между пунктами отправления/получения и ПОТ (c_{ik}, c_{mj}), а также между ПОТ (c_{km}), т. е. представляется в виде суммы $c_{ik} + c_{mj} + \alpha c_{km}$, где α – показатель эффекта масштаба ($0 \le \alpha \le 1$); c_{ij} – стоимость транспортировки грузовой единицы по прямому маршруту.

Целевая функция минимизирует суммарные транспортные расходы по доставке грузов от отправителя к получателю через ПОТ за счет нахождения наиболее эффективной структуры транспортной сети.

Рассмотрим влияние коэффициента эффекта масштаба α на суммарные транспортные расходы по доставке грузов в зависимости от выбранной схемы доставки. Для определения суммарных транспортных расходов представленные модели были реализованы и рассчитаны в интегрированной среде разработки MATLAB с использованием оптимизационного пакета CPLEX. Расчёты проводились для 8, 10, и 12 узлов с фиксированным количеством ПОТ – 3 и 4, суммарные транспортные расходы рассчитывались при изменении коэффициента α от 0 до 1 с интервалом 0,1. Параметры W_{ij} и c_{ij} задаются случайными значениями на определённом интервале.

Результаты расчётов представлены на рис. 2–4, где цифрами 1, 2, 3 обозначены графики для моделей с 3-мя ПОТ, а цифрами 4, 5, 6 – для моделей с 4-мя ПОТ.

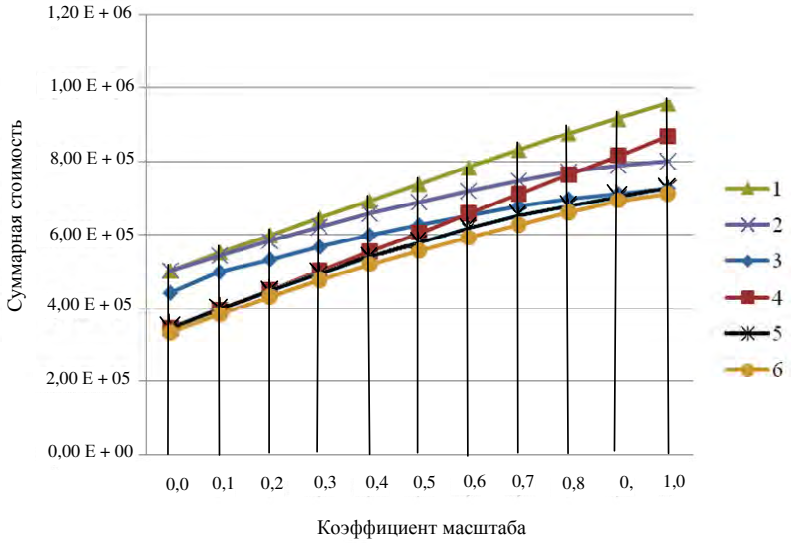


Рис. 2. Зависимость суммарных транспортных расходов от коэффициента α для 8 узлов

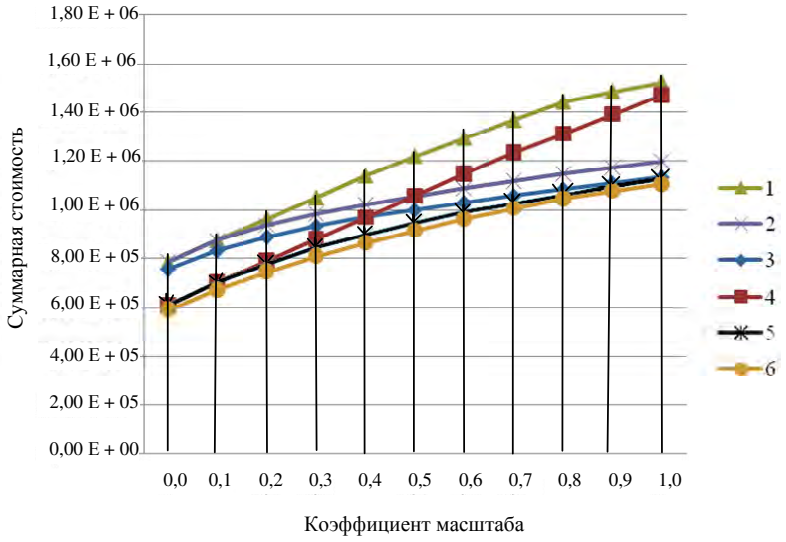


Рис. 3. Зависимость суммарных транспортных расходов от коэффициента α для 10 узлов

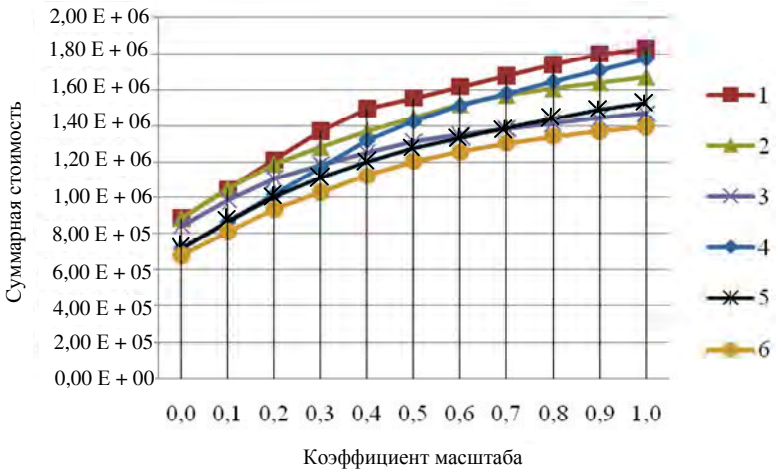


Рис. 4. Зависимость суммарных транспортных расходов от коэффициента α для 12 узлов

На основании приведённых расчётов можно сделать следующие выводы:

1. При одинаковом количестве ПОТ суммарные транспортные расходы для модели, допускающей прямое соединение узлов отправления/получения, всегда будут меньше, чем для модели без прямых связей и с возможностью привязки узла к нескольким ПОТ. Соответственно, издержки для модели с привязкой узла к нескольким ПОТ всегда будут меньше, чем для модели с привязкой узла только к одному ПОТ. Только для небольших значений коэффициента α (близких к нулю) суммарные издержки для всех трёх моделей будут равны. При увеличении α разница в стоимости будет возрастать. Таким образом, для распределительных систем с количеством узлов n и количеством ПОТ p и оптимальным решением F_1, F_2, F_3 для моделей 1, 2, 3 соответственно, можно утверждать, что $F_1 \le F_2 \le F_3$ (табл.).

Это следует из того факта, что любое допустимое решение для модели 1 будет являться допустимым решением для модели 2 и любое допустимое решение для модели 2 будет являться допустимым решением для модели 3 [9].

2. Для небольших значений α все модели имеют тенденцию к использованию ближайших ПОТ, при увеличении α выбор ближайшего к узлу ПОТ не всегда является оптимальным. Это справедливо не только для модели с множественной привязкой, но и для модели с прикреплением узла только к одному ПОТ.

3. С увеличением α количество узлов, прикреплённых к нескольким ПОТ, возрастает. Привязка к нескольким ПОТ происходит даже при небольших значениях α .

4. С увеличением α расстояние между ПОТ играет всё более важную роль в суммарных затратах на транспортирование. Это приводит к изменениям в размещении ПОТ – терминалы размещаются ближе друг к другу.

5. Для низких и средних значений α суммарные издержки ниже для первой модели с 4-мя ПОТ, чем для второй и третьей модели с 3-мя ПОТ. При $\alpha \approx 0{,}4$ и $\alpha \approx 0{,}5$ более выгодным становится использование моделей 3 и 2, с 3-мя ПОТ (рис. 5). Таким образом, при увеличении стоимости транспортирования между ПОТ становится выгодным сокращение числа ПОТ и привязка узла к нескольким ПОТ с добавлением прямых связей. В данных моделях не учитываются затраты по эксплуатации и размещению дополнительного ПОТ, иначе суммарные затраты для модели 1 с 4-мя ПОТ могли быть значительно выше.

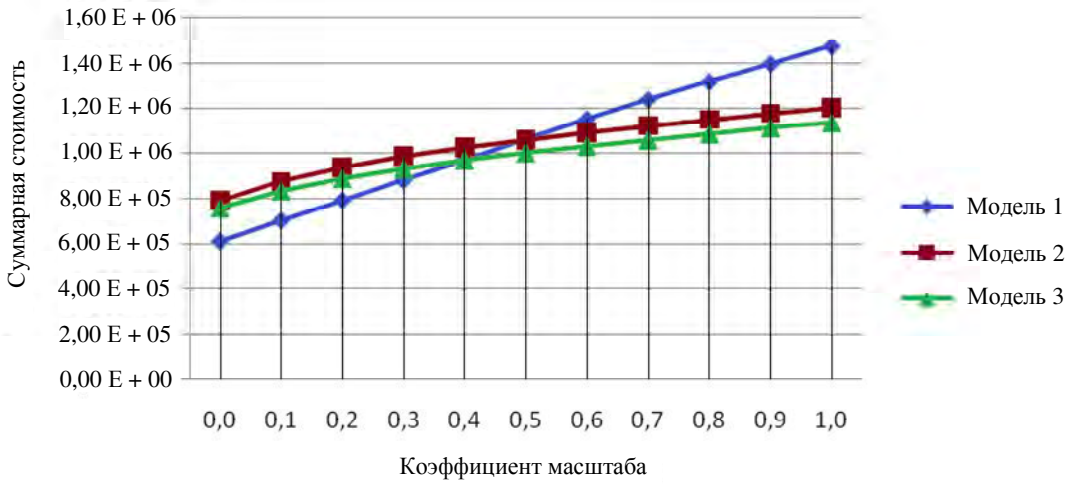
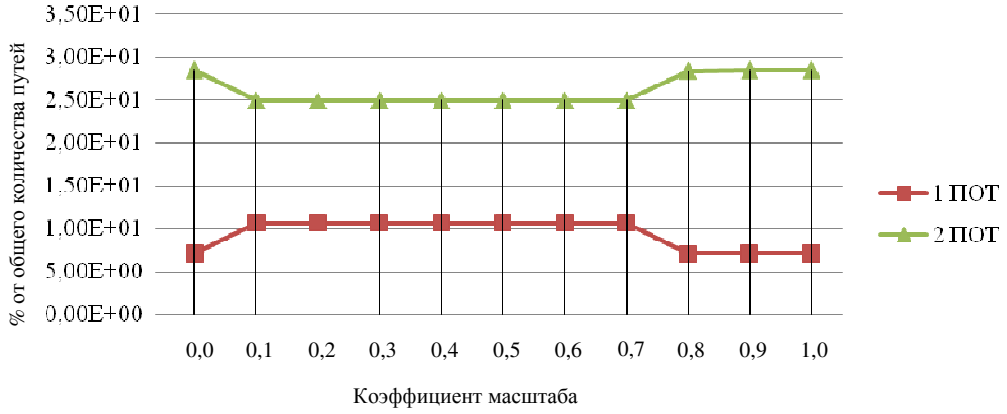
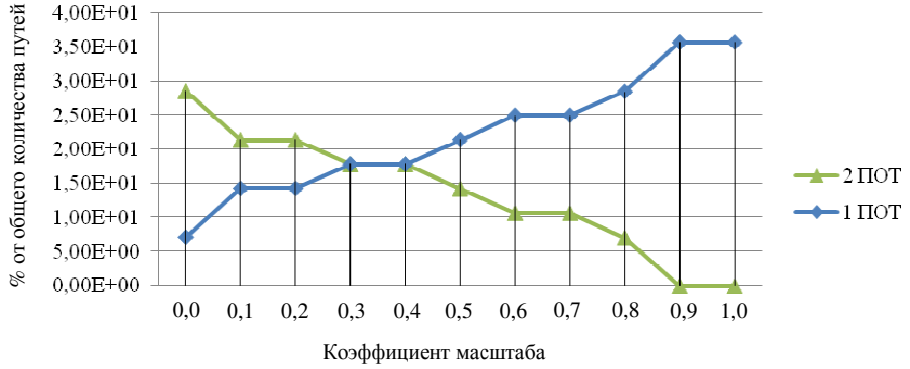


Рис. 5. Зависимость суммарных транспортных расходов от коэффициента α и количества ПОТ для 10-ти узлов

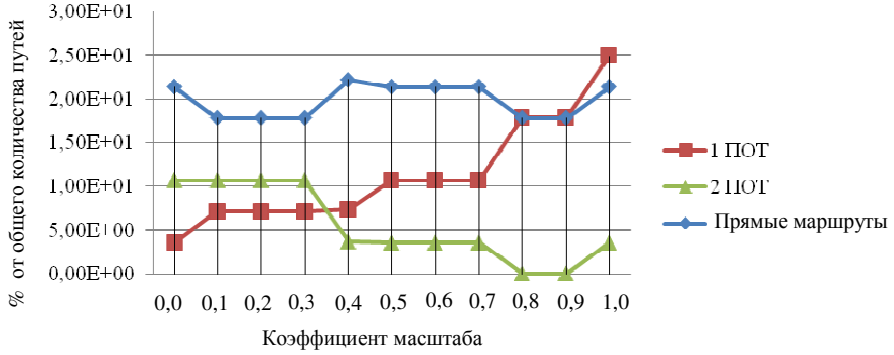
В моделях 2 и 3 с увеличением значения α акцент смещается к преобладанию прямых маршрутов и маршрутов, использующих один ПОТ. В случае модели 1 сетевая структура менее чувствительна к изменениям стоимости транспортировки между ПОТ. Данный вывод подтверждается графиками, отражающими количество маршрутов, проходящих между узлами через 1 и 2 ПОТ, а также прямых маршрутов для 10-ти узлов и 3-х ПОТ (рис. 6, *а–в*).



а



б



в

Рис. 8. Зависимость количества типов маршрутов от коэффициента α:
а – для математической модели 1; *б* – для математической модели 2;
в – для математической модели 3

Таким образом, из приведённых графиков видно, что значение коэффициента α существенно влияет на оптимальную привязку узлов к ПОТ. И зачастую на первый взгляд очевидные решения не обязательно являются оптимальным выбором, это одинаково справедливо как для одиночной привязки, так и для множественной.

Заключение

Так как прямая доставка грузов в районы Крайнего Севера возможна только воздушным транспортом, а доставка большого количества строительных материалов, труб, оборудования и генеральных грузов осуществляется только морскими судами или судами смешанного типа «река-море» через промежуточные узлы, то для минимизации транспортных издержек необходимо использовать модель без прямых связей и с возможностью привязки к нескольким ПОТ.

Кроме того, в рассмотренных математических моделях необходимо учесть тот факт, что в реальной транспортной системе узлы с размещёнными в них ПОТ определены заранее. Таким образом, при проектировании транспортной сети в районах Крайнего Севера необходимо рассматривать модель без прямых связей, с возможностью привязки грузоотправителей и грузополучателей к нескольким ПОТ и с фиксированным размещением ПОТ в транспортной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Изотов О. А.* Морские порты России: современное состояние и перспективы развития / О. А. Изотов, А. В. Бологов, А. В. Кириченко, О. В. Соляков. М.: Моркнига, 2014. 321 с.

2. *Новикова А. А.* Анализ и перспективы развития арктических портов России / А. А. Новикова // Материалы 2-й межвуз. науч.-практ. конф. «Системный анализ и логистика на транспорте» (Санкт-Петербург, 10–11 апреля 2014 г.). СПб., 2014.

3. *О Стратегии* развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 8 декабря 2010 г. № 2205-р // Собрание законодательства Российской Федерации от 20 декабря 2010 г. № 51. Ст. 6954.

4. *Проект* «Стратегии развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года», одобрен Морской коллегией при Правительстве Российской Федерации 31 октября 2012 года // URL: http://www.rosmorport.ru/uploadify/988-f11a995b44861c9c2b1c7e0f502b433e.

5. *Campbell J. F.* Location and Allocation for Distribution Systems with Transshipments and Transportation Economies of Scale / J. F. Campbell // Annals of Operations Research. 1992. No. 40. P. 77–99.

6. *Головцов Д. Л.* Задача маршрутизации судов с различной грузоподъёмностью морского транспортного комплекса Арктической зоны России / Д. Л. Головцов // Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2015. № 6 (34). С. 85–92.

7. *O'Kelly M. E.* The hub network design problem: a review and synthesis / M. E. O'Kelly, H. J. Miller // Journal of Transport Geography. 1994. No. 2. P. 31–40. DOI:10.1016/0966-6923(94)90032-9.

8. *Skorin-Kapov D.* Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems / D. Skorin-Kapov, J. Skorin-Kapov, M. E. O'Kelly // European Journal of Operational Research. 1996. No. 94. P. 582–593. DOI:10.1016/0377-2217(95)00100-X.

9. *Campbell J. F.* Integer programming formulations of discrete hub location problems / J. F Campbell // European Journal of Operational Research. 1994. No. 72. P. 387–405. DOI:10.1016/0377-2217(94)90318-2.

10. *Aykin T.* Networking Policies for Hub-and-Spoke Systems with Application to the Air Transportation System / T. Aykin // Transportation Science. 1995. No. 29 (3). P. 201–221. DOI: 10.1287/trsc.29.3.201.

Статья поступила в редакцию 28.01.2016

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Изотов Олег Альбертович – Россия, 198035, Санкт-Петербург; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; канд. техн. наук; доцент кафедры «Порты и грузовые терминалы»; iztv65@rambler.ru.

Головцов Дмитрий Львович – Россия, 196240, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; соискатель кафедры «Системный анализ и логистика»; Kaf16@list.ru.

O. A. Izotov, D. L. Golovtsov

MATHEMATICAL MODELING OF MULTIMODAL TRANSPORTATION IN THE FAR NORTH

Abstract. The paper considers the transport systems organized on the principle of "many-to-many", i. e. the systems, when freight traffic from several points of departure must be delivered to multiple destinations. One of the forms improving the organization of such shipments is the concentration of freight flows in the terminal, followed by the delivery of goods to destinations. In these transport systems, the organization and management of traffic uses three main strategies: each point of origin/destination can be connected to only one terminal; each point of origin/destination can interact with various terminals;

each point of origin/destination can interact with other points directly. For each strategy, the appropriate mathematical models are presented. The objective function in these mathematical models minimizes total transport costs. The cost of transporting the load unit between the points of origin/destination is the sum of the values between the points of origin/destination and the terminals, as well as between the terminals. The cost of transporting the load unit between the commercial export terminals is lower than that of the transportation of cargo between the places of origin/destination and the commercial export terminals due to the effect of economies of scale. The calculations that determine the effect of economies of scale factor on the total transport costs to deliver goods according to the chosen delivery model are made. The calculations were carried out for 8, 10 and 12 points of origin/destination with a fixed number of commercial export terminals, the total costs were calculated when the factor of economy of scale was changing between 0 and 1 with an interval of 0.1. The amount of cargo and the cost of the load unit were set with random values at a certain interval. The mathematical models were designed in the integrated environment of the development MATLAB using the optimization package CPLEX.

Key words: many-to-many distribution, hub-and-spoke transport network, integer programming, economy of scale, commercial export terminal.

REFERENCES

1. Izotov O. A., Bologov A. V., Kirichenko A. V., Soliakov O. V. *Morskie porty Rossii: sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia* [Sea ports in Russia: present state and prospects of development]. Moscow, Morkniga Publ., 2014. 321 p.

2. Novikova A. A. Analiz i perspektivy razvitiia arkticheskikh portov Rossii [Analysis and prospects of development of arctic ports in Russia]. *Materialy 2-i mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sistemnyi analiz i logistika na transporte» (Sankt-Peterburg, 10–11 aprelia 2014 g.*). Saint-Petersburg , 2014.

3. O Strategii razvitiia morskoi deiatel'nosti Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda [On the strategy of development of marine acitivity in the Russian Federation up to 2030]. Rasporiazhenie Pravitel'stva RF ot 8 dekabria 2010 g. № 2205-r. *Sobranie zakonodatel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 20 dekabria 2010 g.* № 51. St. 6954.

4. *Proekt «Strategii razvitiia morskoi portovoi infrastruktury Rossii do 2030 goda», odobren Morskoi kollegiei pri Pravitel'stve Rossiiskoi Federatsii 31 oktiabria 2012 goda* [Project "Strategies of development of sea port infrastructure in Russia up to 2030", adopted by Marine Board in the government of the Russian Federation]. Availabe at: http://www.rosmorport.ru/uploadify/988-f11a995b44861c9c2b1c7e0f502b433e.

5. Campbell J. F. Location and Allocation for Distribution Systems with Transshipments and Transportation Economies of Scale. *Annals of Operations Research*, 1992, no. 40, pp. 77–99.

6. Golovtsov D. L. Zadacha marshrutizatsii sudov s razlichnoi gruzopod"emnost'iu morskogo transportnogo kompleksa Arkticheskoi zony Rossii [Task of routing of the vessels with different load capacity of the Marine Transport Complex of the Arctic zone in Russia]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2015, no. 6 (34), pp. 85–92.

7. O'Kelly M. E., Miller H. J. The hub network design problem: a review and synthesis. *Journal of Transport Geography*, 1994, no. 2, pp. 31–40. DOI:10.1016/0966-6923(94)90032-9.

8. Skorin-Kapov D., Skorin-Kapov J., O'Kelly M. E. Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems. *European Journal of Operational Research*, 1996, no. 94, pp. 582–593. DOI:10.1016/0377-2217(95)00100-X.

9. Campbell J. F. Integer programming formulations of discrete hub location problems. *European Journal of Operational Researc*, 1994, no. 72, pp. 387–405. DOI:10.1016/0377-2217(94)90318-2.

10. Aykin T. Networking Policies for Hub-and-Spoke Systems with Application to the Air Transportation System. *Transportation Science*, 1995, no. 29 (3), pp. 201–221. DOI: 10.1287/trsc.29.3.201.

The article submitted to the editors 28.01.2016

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Izotov Oleg Albertovich – Russia, 198035, Saint-Petersburg; State University of Maritime and Inland Shipping named after Admiral Makarov; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department "Ports and Cargo Terminals"; iztv65@rambler.ru.

Golovtsov Dmitriy Lvovich – Russia, 196240, Saint-Petersburg; Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; Candidate of the Department "System Analysis and Logistics"; Kaf16@list.ru.