УДК 656.07+06

Д. В. ЛИСОВЕНКО
Ростовский государственный университет путей сообщения,
г. Ростов-на-Дону
dmitriy.lisovenko@yahoo.com

ФОРМИРОВАНИЕ БАЛАНСА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУЗОВОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТЕРМИНАЛОВ МЕТОДОМ ГРАВИТАЦИОННОГО ТЯГОТЕНИЯ

Рассматриваются особенности функционирования транспортно-логистической системы Северо-Кавказской железной дороги, характеризующейся интенсивным однонаправленным грузопотоком в порты Азово-Черноморского бассейна. Анализируются ключевые ограничения существующей инфраструктуры, связанные с недостаточной перерабатывающей способностью припортовых станций. Предложено решение проблемы путем создания грузораспределительных терминалов, что позволит оптимизировать логистические процессы и повысить пропускную способность железнодорожной сети.

В рамках исследования транспортной инфраструктуры Юга России особое внимание заслуживает анализ функционирования Северо-Кавказской железной дороги (филиал ОАО «РЖД»), работа которой характеризуется выраженной асимметрией грузопотоков в направлении портов Азово-Черноморского бассейна с формированием устойчивой логистической цепочки с чётко очерченными узлами распределения. Ключевыми точками гашения грузопотоков являются станция Новороссийск, специализирующаяся на перевалке чёрных металлов, зерновых культур и контейнерных грузов, Туапсе, принимающая чёрные металлы, нефтеналивные грузы и химические удобрения, Вышестеблиевская, ориентированная на перевалку угля и нефтеналивных грузов. Кроме этих крупных станций часть грузопотока распределяется по ряду менее мощных портовых станций, таких как Азов, Таганрог, Темрюк, Заречная, Грушевая и Кавказ.

Основным лимитирующим фактором работы Северо-Кавказской железной дороги выступает дефицит производственных мощностей в сфере выгрузки и вывода порожних вагонов из портовых зон. Эмпирические данные по станции Новороссийск демонстрируют, что среднее время нахождения контейнерного поезда составляет 48 часов, при этом непосредственно на грузовые операции затрачивается лишь 4–8 часов. Остальная часть временного ресурса расходуется на вспомогательные процессы: расформирование

составов, формирование подач по фронтам выгрузки, подготовку вагонов к погрузочно-выгрузочным операциям, а также документальное сопровождение перевозок. Особую сложность создаёт необходимость двойного таможенного контроля, существенно увеличивающего административную нагрузку. Сходная структура временных затрат наблюдается и при обработке иных категорий грузов, что указывает на системный характер проблемы.

Попытки расширения перерабатывающей способности крупных портовых станций сталкиваются с объективными ограничениями географического и градостроительного характера. В частности, плотная городская застройка в окрестностях ключевых узлов и сложный рельеф местности делают масштабную модернизацию технически затруднительной. Для малых портовых станций проблема носит иной характер, так как требуемые инвестиции в развитие инфраструктуры сопряжены с высокими рисками. Основной опасностью выступает потенциальная переориентация грузо- и вагонопотоков в перспективе, что ставит под сомнение экономическую целесообразность капитальных вложений и их окупаемость.

В качестве перспективного направления оптимизации предлагается формирование сети грузораспределительных терминалов, интегрированных в логистическую систему портов Юга России. Размещение таких терминалов в непосредственной близости от крупных выгрузочных станций позволит децентрализовать ряд операций, входящих в цикл оборота вагона. В частности, на терминалы может быть перенесена значительная часть административных и технических процедур: таможенное оформление грузов, работа с перевозочной документацией, проведение коммерческого и технического осмотра подвижного состава. Для небольших припортовых станций создание подобных объектов открывает возможности диверсификации услуг, повышая их конкурентоспособность на рынке транспортно-логистических услуг. Подобная ситуация негативно сказывается на конкурентоспособности железнодорожно-водного способа транспортировки в глазах зарубежных грузоотправителей, что ведёт к постепенному оттоку клиентов и, как следствие, снижению доходов ОАО «РЖД».

Ключевым фактором повышения эффективности железнодорожно-водных перевозок выступает минимизация времени простоя вагонов на путях портовых терминалов. Сокращение простоев способно оказать мультипликативный эффект, связываемый не только с увеличением перегрузочной способности отдельных узлов, но и повышением общей провозной мощности железнодорожной сети. Особую актуальность приобретает синхронизация работы железнодорожного и водного транспорта, обусловленная существенным дисбалансом в стоимости услуг. Так, тарифы на использование водного транспорта, а также плата за простой судов у причалов многократно превышают расходы на эксплуатацию железнодорожных вагонов. В этой связи критическое значе-

ние приобретает способность оперативно доставлять крупные партии грузов к портовым причалам, обеспечивая бесперебойность мультимодальных перевозок и снижая совокупные логистические издержки.

Актуальным является вопрос увеличения провозной способности припортовой железнодорожной системы за счет строительства тылового грузораспределительного терминала, который заберет на себя функции порта и железнодорожной станции, не связанные непосредственно с грузовыми операциями на путях порта. На тыловой терминал могут быть вынесены такие технологические операции, как подбор подач вагонов по фронтам, таможенный контроль и оформление груза, коммерческий и технический осмотр подвижного состава, заполнение перевозочных документов и так далее.

В процессе определения пространственной локализации тыловых терминалов первостепенное значение приобретают топографические особенности территории и степень насыщенности её городской инфраструктурой. Локализация терминалов за пределами урбанизированных территорий способствует оптимизации процессов автодоставки грузов и существенно разгружает магистральную сеть от транзитного транспорта. Кроме того, экстерриториальное размещение объектов позволяет значительно снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду в пределах жилой застройки, что особенно актуально для крупных агломераций с высокой плотностью населения [2].

В контексте формирования эффективной логистической архитектуры транспортного узла особую значимость приобретает проблема научно обоснованного позиционирования распределительных комплексов. При этом первостепенное внимание уделяется поиску компромиссного решения, которое позволит достичь максимального снижения совокупных затрат на осуществление грузовых перевозок при соблюдении всех технологических требований.

Математическая постановка данной задачи предполагает построение многофакторной модели, в рамках которой осуществляется поиск оптимальных параметров размещения терминалов путём минимизации комплексной целевой функции, учитывающей весь спектр логистических издержек.

Для решения транспортной задачи необходимо минимизировать целевую функцию [1]

$$\Pi(L) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} q_i c_{ij} L_{ij} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{g} q_i c_{ik} L_{ik} + \sum_{i=1}^{n} B_i E_{\text{н}} \to \min$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^{n} q_i = Q;\ L_{ij} > 0;\ L_{ik} > 0,$$

где q_i – объём перевозок грузов для i-го терминала (i = 1, …, n); j – место размещения i-го терминала назначения груза (j = 1, …, m); k – грузополучатели городской агломерации (k = 1, …, g); Q – общий объем перевозок i-х грузов от распределительного терминала, расположенного в j-м месте узла

до k-х грузополучателей; c_{ij} – стоимость завоза 1 т груза до i-го терминала, расположенного в j-м месте узла, руб./т·км; c_{ik} – стоимость вывоза 1 т груза от i-го терминала до k-го грузополучателя; B_i – капитальные затраты на строительство i-го терминала по варианту размещения, млн руб.; $E_н$ – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений.

Когда узловая транспортно-складская система состоит из нескольких терминалов, необходимо учитывать различные факторы, влияющие на стоимость грузоперевозок. Данное исследование позволяет предположить, что увеличение количества складов может привести к увеличению стоимости доставки товаров на склады. Однако расположение складов рядом с местом потребления товаров может снизить стоимость доставки товаров покупателям.

Транспортно-складская система включает три основных типа складов: снабженческие (хранение сырья и материалов), производственные (обеспечение производства) и распределительные (демпфер колебаний объемов перевозок различными видами транспорта). Для оптимального размещения складов применяются различные методы: экономико-математический, метод пробной точки, метод «Виаль», гравитационный, метод центра тяжести, модель Вон Тунена и др.

По результатам анализа методов размещения складов гравитационный метод демонстрирует наибольшие преимущества. Он учитывает случайные процессы, обеспечивает оперативное управление, позволяет моделировать схему компоновки и адаптируется к технологии работы.

Гравитационный метод является наиболее эффективным для определения местоположения складов, так как учитывает величину грузопотоков, позволяет определить центр притяжения, обеспечивает оптимальное распределение транспортных потоков, даёт возможность работать со случайными факторами.

Для оценки взаимодействия распределительных логистических терминалов с местоположением складов (частью складской сети) проведём интерпретацию гравитационной модели [3]:

$$W_{ij} = \alpha \frac{q_{ij} Q_i}{l_{ij}^2},$$

где α – коэффициент, рассчитываемый отношением

$$\alpha = P_{ij} / P_{общ},$$

P_{ij} – тонно-километровая работа по доставке грузов: $P_{общ}$ – общая транспортная работа; q_{ij} – объем складского грузопотока; Q_i – мощность складской сети узла; l_{ij} – расстояние между получателем (складом) и терминалом.

Актуальность исследования подтверждается тем, что современным логистическим операторам необходимо обеспечить эффективность транспортировки товаров от терминала до получателя. Реализация данной задачи требует анализа устойчивости транспортных связей, что можно достичь с помощью показателя *W*.

Чем больше величина показателя *W*, тем устойчивее становятся транспортные связи между логистическим терминалом и предполагаемым получателем (складом). Это свидетельствует о высоком уровне надежности и безопасности доставки грузов, что, в свою очередь, способствует оптимизации логистических процессов и снижению затрат на доставку.

Таким образом, анализ показателя *W* является важным этапом в планировании логистических операций и позволяет эффективно организовать транспортировку товаров в современных условиях конкурентного рынка.

В качестве экспериментальных станций для базирования тыловых грузораспределительных терминалов были выбраны станции «Б» (Т1) как терминал, обрабатывающий порты по станциям «А» (С1), «Е» (С2), «Т» (С3), а также подготавливающий поезда для станций «М-П» и «Б-П» в перспективе развития региона. Второй станцией для перспективного размещения тылового грузораспределительного терминала рассматривается станция «Р» (Т2) для обработки портовых мощностей по станциям «Н» (С1), «П» (С2), «ТМ» (С3) и «В» (С4) (рисунок 1).

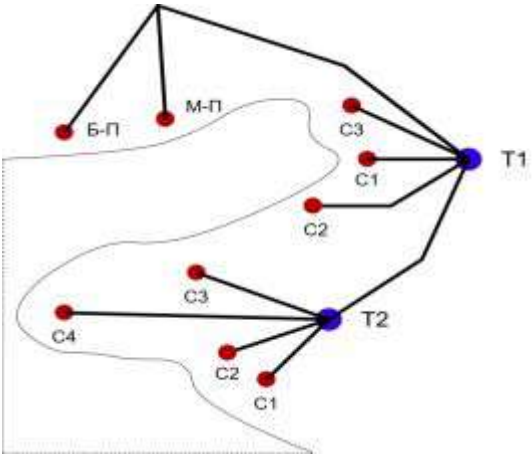


Рисунок 1 − Варианты взаимодействия грузораспределительных терминалов (Т1, Т2) с портами Северо-Кавказской железной дороги

Составим матрицы расстояний и объёмов перевозок, тыс. тонн/сут логистических терминалов и складов, для обоих вариантов узла (таблицы 1, 2).

Таблица 1 – **Матрица расстояний по вариантам взаимодействия логистических терминалов и складов**

i / *j*	С1	С2	С3	С4	$\sum l_{ij}$
Т1	30	160	82	–	272
Т2	30	81	71	127	309

Таблица 2 – **Матрица объемов потребления грузов**

i / *j*	С1	С2	С3	С4	$\sum q_i = Q$
Т1	3,84	1,32	2,65	–	7,81
Т2	9,2	7,12	3,96	3,08	23,36

Тогда транспортная работа, т·км, для каждого склада будет определяться по формуле

$$p_{ij} = q_j l_{ij}.$$

Транспортная работа, тыс. т·км, для первого варианта:

$$p_{\text{Т1-С1}} = 3{,}84 \cdot 33 = 115{,}2;$$
$$p_{\text{Т1-С2}} = 1{,}32 \cdot 163 = 211{,}2;$$
$$p_{\text{Т1-С3}} = 2{,}65 \cdot 74 = 217{,}3.$$

Для второго варианта:

$$p_{\text{Т2-С1}} = 9{,}2 \cdot 30 = 276;$$
$$p_{\text{Т2-С2}} = 7{,}12 \cdot 81 = 576{,}7;$$
$$p_{\text{Т2-С3}} = 3{,}96 \cdot 71 = 281{,}16.$$
$$p_{\text{Т1-С4}} = 3{,}08 \cdot 127 = 391{,}16.$$

Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – **Матрица общей транспортной работы**

В тысячах тонно-километров

i / *j*	С1	С2	С3	С4	$\sum p_{ij} = P_{\text{общ}}$
Т1	115,2	211,2	217,3	–	543,7
Т2	276	576,7	281,16	391,16	1525,02

Далее определяются коэффициенты пропорциональности гравитационной модели. Для первого грузораспределительного терминала:

$$\alpha_{\text{Т1–С1}} = \frac{115{,}2}{543{,}7} = 0{,}212;\ \alpha_{\text{Т1–С2}} = \frac{211{,}2}{543{,}7} = 0{,}388;\ \alpha_{\text{Т1–С3}} = \frac{217{,}3}{543{,}7} = 0{,}4.$$

Для второго грузораспределительного терминала:

$$\alpha_{\text{Т2–С1}} = \frac{276}{1525{,}02} = 0{,}18;\ \alpha_{\text{Т2–С2}} = \frac{576{,}7}{1525{,}02} = 0{,}37;\ \alpha_{\text{Т2–С3}} = \frac{291{,}16}{1525{,}02} = 0{,}184;$$

$$\alpha_{T2-C4} = \frac{391{,}16}{1525{,}02} = 0{,}256.$$

Матрица коэффициентов приведена в таблице 4.

Таблица 4 – **Матрица коэффициентов пропорциональности по вариантам взаимодействия логистических терминалов со складами**

i \ *j*	C1	C2	C3	C4	$\sum\alpha_{ij}$
T1	0,212	0,388	0,4	–	1
T2	0,18	0,37	0,184	0,256	1

После определения коэффициентов пропорциональности определяются значения гравитационных связей, которые приведены в таблице 5.

Таблица 5 – **Матрица гравитационных связей узла**

i \ *j*	C1	C2	C3	C4	$\sum w_{ij} = W$
T1	2,137	0,235	0,101	–	2,473
T2	1,289	0,759	0,239	0,145	2,432

Как видно из таблицы 5, значения гравитационных связей опорных станций «Р» и «Б» для размещения грузораспределительных терминалов имеют схожую величину, что свидетельствует о верном выборе мест дислоцирования «сухих портов» и гарантирует равномерное распределение сортировочных мощностей портовых грузопотоков между двумя данными терминалами.

На основе матрицы объемов потребления грузов, логистических терминалов и складов (см. таблицу 2) и матрицы гравитационных связей узла (см. таблицу 5), принимая во внимание схожие гравитационные связи *W* (разница 1,7 %) становится возможным установление баланса распределения грузовой работы между железнодорожными терминалами Т1 и Т2, не смотря на то, что Т2 обрабатывает в 3 раза больше грузов, чем Т1, и разница составляет 15,55 тыс. т/сут. Сопоставление приведённых выше расчётных данных говорит о корректности применения метода гравитационного тяготения при проверке правильности размещения грузораспределительных терминалов по географико-инфраструктурным соображениям, даже при условии большой разницы в объёме грузовой работы железнодорожных терминалов.

Таким образом, предлагается новая модель определения местоположения сети грузораспределительных терминалов. Пусть имеется группа потребителей С1, С2, С3, …, C_N и для удовлетворения их потребностей, исходя из типовых схем грузораспределительных терминалов и логистико-территориальных условий выбирается некоторое количество грузораспре-

делительных терминалов $Т_N$. При условии что сумма грузовой работы всех потребителей рассматриваемого полигона ΣQ_N = const, оптимальными местами размещения грузораспределительных терминалов будут такие, при которых силы гравитационного тяготения W между различными потребителями грузопотоков и обслуживающими их грузораспределительными терминалами будут стремиться к равенству между собой:

$$W_1 = W_2 = W_3 = \ldots = W_N.$$

Выбор гравитационной модели обоснован ее способностью точно оценивать устойчивость транспортных связей между терминалами и пунктами назначения. Показатель гравитационного притяжения позволяет объективно определить оптимальное расположение терминалов, минимизируя совокупные логистические издержки и обеспечивая максимальную эффективность грузоперевалки.

Расчеты для станций Батайск и Разъезд 9 км подтвердили высокую точность метода. Полученные значения гравитационных связей свидетельствуют о правильности выбора мест размещения терминалов. Применение гравитационной модели позволило учесть не только текущие объёмы перевозок, но и перспективы развития транспортно-логистической системы региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 *Король, Р. Г.* Логистика в транспортной системе / Р. Г. Король. – СПб. : Питер, 2021. – 324 с.

2 *Числов, О. Н.* Методы рационального размещения логистических транспортно-складских комплексов и распределения грузопотоков в крупных городских агломерациях / О. Н. Числов, В. В. Трапенов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 1(61). – С. 87–97.

3 *Числов, О. Н.* Модифицированный гравитационный метод в размещении распределительных терминалов портовых железнодорожных транспортно-технологических систем / О. Н. Числов, В. Л. Люц // Инженерный вестник Дона. Электронный журнал. – 2012. – № 4. – Ч. 2. – URL: http://ivdon-ror. headmade. locum.ru/ magazine/ archive/ n4p2y2012/1420) (дата доступа: 08.09.2025).

D. V. LISOVENKO

DEVELOPMENT OF METHODS FOR FORMING A NETWORK OF CARGO DISTRIBUTION TERMINALS ON THE SITE A PORT RAILWAY

This article examines the operational features of the North Caucasus Railway's transport and logistics system, characterized by intensive unidirectional freight traffic to ports in the Azov-Black Sea basin. Key limitations of the existing infrastructure, related to the insufficient handling capacity of port stations, are analyzed. A proposed solution involves the creation of freight distribution terminals, which will optimize logistics processes and increase the capacity of the railway network.

Получено 09.10.2025