

УДК 911.2:656.2(476)

А.П. Безрученюк,
*аспирант кафедры экономической географии зарубежных стран,
ассистент кафедры экономической географии Беларуси
и государств Содружества БГУ*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ ДЛЯ ЭКОНОМИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Введение. Графо-сетевой анализ применяется в экономической географии и смежных дисциплинах при изучении особенностей конфигурации транспортных сетей, которые могут быть представлены при помощи теории графов, абстрагирующей и упрощающей эти сети до набора взаимосвязанных вершин. Впервые теория графов была представлена Л. Эйлером (Германия) в XVIII в. по результатам анализа Семи Мостов г. Кенигсберга. В 1960–1970-х гг. данная теория широко применялась для изучения дорожных сетей. Основные положения теории графов и введение в научный оборот таких индикаторов, как цикломатическое число графа, диаметр сети, внепространственные индексы (α , β , γ , др.), были предложены американским ученым К. Канским. Изучением эффекта влияния сетевого роста на фактическое и потенциальное количество связующих элементов (ребер) системы при использовании эмпирических данных занимался американский ученый Р. Бон. В середине 1970-х гг. применение теории графов сократилось, уступая место новым моделям транспортного спроса. В настоящее время анализ региональных транспортных сетей с использованием эмпирических данных встречается нечасто и принадлежит Э. Тааффе и Ж.-П. Родри, Т. Лэму и Г. Шулеру, которые применяли индексы канского, дополняя их факторами времени. Ф. Лаксе (США) были применены индексы теории графов при анализе степени, центральности и устойчивости иерархии морских портов при изучении контейнерных перевозок. Графо-теоретический анализ железнодорожных систем Македонии проводился Д. Талевски, а в Швейцарии – А. Эратом [1–4; 6]. Для школы социально-экономической географии Беларуси внедрение теории графов и метода графо-теоретического анализа вносит вклад в развитие общей методики экономико-географического изучения транспорта и нацелено на дальнейшую разработку оптимизационных моделей развития транспортных сетей.

Цель данного исследования – разработка и анализ графа железных дорог Беларуси. Объектом исследования послужил основной оператор грузовых и пассажирских перевозок республики – предприятие «Белорусские железные дороги». Предметом исследования – транспортная сеть железнодорожного сообщения Республики Беларусь (а именно железнодорожные пути общего пользования, находящиеся в подчинении «БелЖД»), которая легла в основу построения модели графа. Основными задачами исследования были: а) выявление преимуществ использования теории графов для экономико-географического анализа транспортной сети; б) построение графа железных дорог Беларуси и проведение сетевого анализа полученного графа при помощи программного обеспечения «Gephi 0.8.1. Beta»; в) апробация гравитационной модели пространственного взаимодействия; г) выделение транспортных узлов по степени центральности расположения в сети; д) разработка предложений по оптимизации железнодорожной транспортной сети по результатам расчетов.

Основная часть. Методология, применяемая в данном исследовании, основана на метрическом инструментарии, определенном теорией графов. Для методики экономико-географического изучения транспорта эта теория имеет ряд преимуществ: позволяет визуализировать структуру транспортной сети, проводить анализ топологических и математических свойств сети; интегрировать граф сети с внешними геоинформационными базами данных.

На первом этапе исследования был произведен отбор транспортных узлов для построения графа сети железнодорожного сообщения Республики Беларусь. Выбор городов был основан в соответствии с иерархическим строением структуры Национальной системы расселения (НСР) и географическим расположением относительно системы международных транспортно-коммуникационных ко-

ридеров, проходящих через Беларусь. В состав конвертированной железнодорожной сети вошли города европейского и национального значения, также были включены другие значимые транспортные узлы, большая часть из которых являются городами регионального значения (согласно классификации НСР) [4, с. 18]. Поскольку система перемещения людей, грузов и информации не ограничена сугубо территорией Беларуси (не является изолированной), то с учетом модели пространственного взаимодействия крупные приграничные населенные пункты стран, граничащих с Беларусью и имеющие железнодорожное сообщение, также были включены с сеть для проведения расчетов. К ним относились г. Вильнюс, г. Белосток, г. Тересполь, г. Ковель, г. Сарны, г. Овруч, г. Чернигов, г. Бахмач, г. Унеча, г. Рославль, г. Смоленск, г. Невель, г. Даугавпилс.

В ходе исследования были собраны данные на уровне городских поселений (транспортных узлов) и линейных элементов сети. Учитывался набор первичных (численность населения транспортных узлов, количество узлов и ребер в сети, расстояние между узлами, географическое положение) и вторичных (сила гравитационного притяжения, диа-

метр сети, показатели степени центральности сети, сетевые индексы графа) индикаторов. Реальное расстояние было использовано для расчетов силы пространственного (гравитационного) взаимодействия.

Создание графа сети проводилось в программном обеспечении «Gephi 0.8.1. Beta» с использованием инструмента GeoLayout для обеспечения точности географической локализации транспортных узлов (для каждого узла использовались два атрибутивных информационных признака – географическая широта и долгота, выраженные в градусах). С применением панели инструментов Statistics вышеупомянутого ПО были проведены анализы степени центральности (Degree Centrality) и промежуточной центральности (Betweenness Centrality) узлов. Отдельно были проведены расчеты γ , β и α индексов, отражающих степень связности и завершенности графа сети железных дорог Беларуси. Результатом моделирования было построение неориентированного графа с общим количеством 50 узлов и 66 ребер в сети, что в последующем выступит научным обоснованием вариантов оптимизации железнодорожной сети Беларуси (рисунок 1).

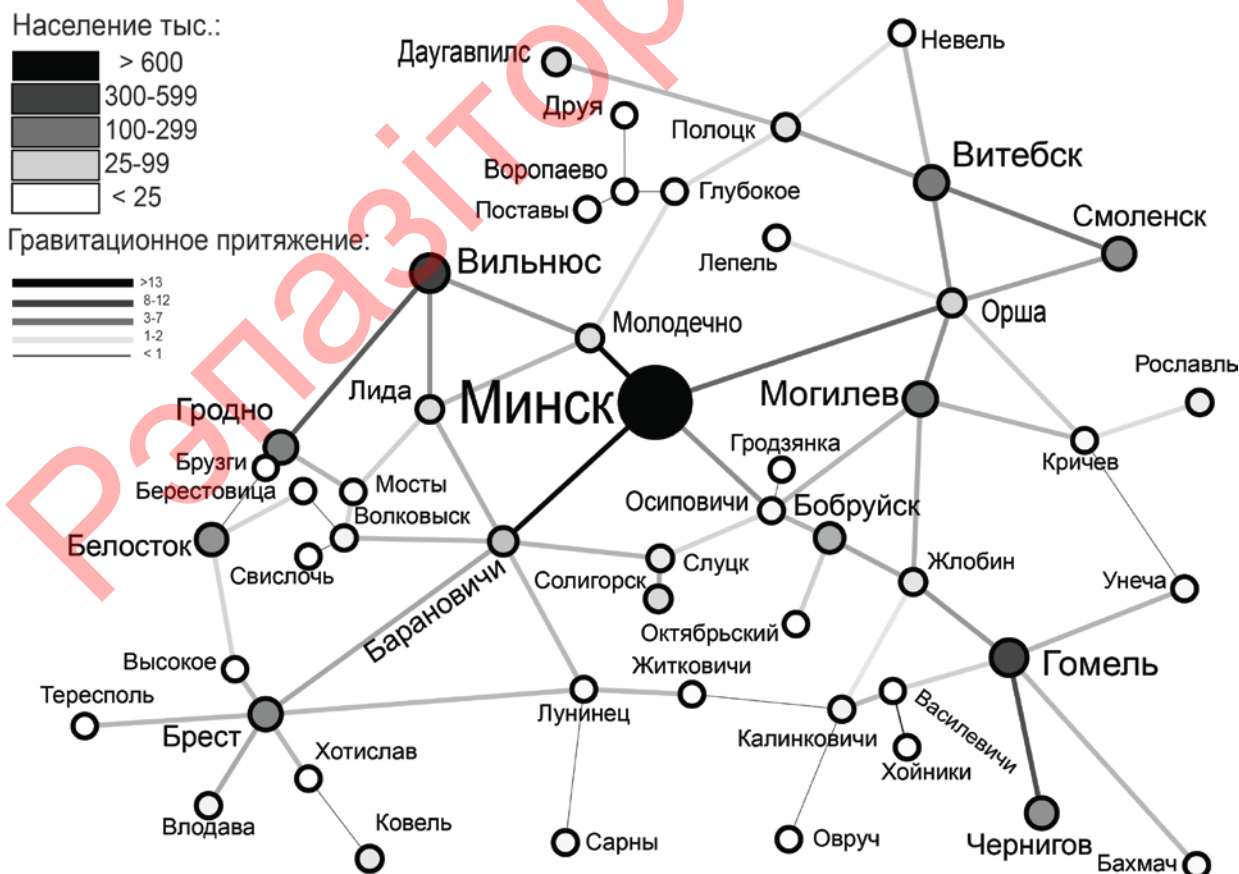


Рисунок 1 – Граф железнодорожной сети Беларуси с результатами расчетов модели пространственного взаимодействия

Показатели связности сети, полученные на основе расчетов индексов γ , β и α , отражают степень связности графа, которая в теории может влиять на транспортную связность сети. Гамма-индекс (γ) является мерой связности графа и интерпретируется как отношение существующих маршрутов транспортной сети (графа) к общему количеству возможных потенциальных маршрутов. Величина индекса варьируется от 0 до 1, значение 1 указывает на завершённую, целиком связанную сеть. Значение индекса для сети железных дорог Беларуси, равное 0,46, показывает, что степень ее связности принимает среднее значение в интервале от 0 до 1, что свидетельствует о наличии потенциала развития сети (это может выступить преимуществом для Республики Беларусь). Бета-индекс (β) также отражает связность графа, а именно среднее количество ребер, приходящихся на один узел. Более сложные сети имеют значение больше 1: чем выше количество связей, тем выше число возможных путей сообщения. Значение индекса для сети железных дорог Беларуси выше среднего и равно 1,32. Альфа-индекс (α) отражает отношение существующих циклов сети к максимально возможному количеству циклов: чем выше значение α , тем больше связность сети. Значение 1 указывает на целиком завершённую сеть (индекс для сети железных дорог Беларуси равен 0,19, что соответствует низкой степени завершенности сети).

По итогам расчетов были получены результаты степеней центральности и промежуточной центральности каждого транспортного узла, входящего в сеть. Индикатор степени центральности представляет собой количество ребер каждого транспортного узла, является отражением их географической связности и тесно коррелирует с их операционными возможностями. Степень центральности основана на концепции, что более важные узлы в иерархии сети имеют наибольшее количество связей. Удалось выделить 3 типа узлов по значению степени центральности: первого, второго и третьего порядка. Железнодорожные узлы первого порядка (Орша, Барановичи, Брест, Гомель, Осиповичи) имеют самую высокую степень центральности (5 и 6). Их доля в общем количестве транспортных узлов составляет 10 %. Вышеперечисленные транспортные узлы расположены на пути следования трансъевропейских транспортно-коммуникационных коридоров (2, 9 и 9Б), что подчеркивает их роль и значение в региональной транспортной

системе. Большинство населенных пунктов сети (28 из 50, или 56 %) являются узлами второго порядка и имеют среднее значение степени центральности от 2 до 4 (рисунок 2А). Можно предположить, что степень их значимости в транспортной сети может варьировать в зависимости от близости расположения узлов первого порядка и возможности их достижения при наименьших временных затратах. Остальные поселения (34 % всех узлов сети) относятся к транспортным узлам 3-го порядка по степени связности и центральности и имеют значение 1. Примерами транспортных узлов данного типа являются окраинные для данной сети узлы: Влодава, Сарны, Хойники, Чернигов, Рославль, др. Также в данную категорию попадают узлы, расположенные внутри сети, – Свислочь, Солигорск, Октябрьский, Лепель, Гродзянка, имеющие ограниченное транспортное сообщение с остальной сетью. Полученные результаты позволили разработать ряд направлений оптимизации сети. На наш взгляд, она возможна за счет установления транспортного сообщения между узлами Лепель–Глубокое, Минск–Слуцк и Солигорск–Лунинец (для возможного завершения трансъевропейского коридора 5 (Львов–Сарны–Лунинец–Минск)).

Показатель промежуточной центральности железнодорожного узла определяется числом кратчайших путей между всеми другими узлами, которые проходят через этот узел. Другими словами, он определяет степень благоприятности расположения транспортного узла в сети в зависимости от ее строения. На практике применение этого статистического показателя удобно при анализе нагрузки на линейный элемент сети [5]. В рассматриваемой сети, согласно расчетам, значение данного показателя составило от 0 до 461,7, при этом высокие значения степени узлов коррелируют с благоприятным экономическим расположением, обусловленным этим типом центральности. Анализ структуры узлов по промежуточной центральности позволяет сделать вывод о значимости транспортных узлов с высокими показателями данного индикатора (в целом в железнодорожной сети Беларуси 9 узлов из 50 (18 %) имеют значение свыше 150). Наибольшая промежуточная центральность характерна для Бреста, Барановичей, Минска, Молодечно и Орши, Лунинца, Глубокое, Гомеля. Доля узлов со значением от 50 до 149 составляет 28 % (14 из 50), со значением от 15 до 49 – 16 % (8 из 50), со значением 0 – 38 % (19 из 50) (рисунок 2Б).

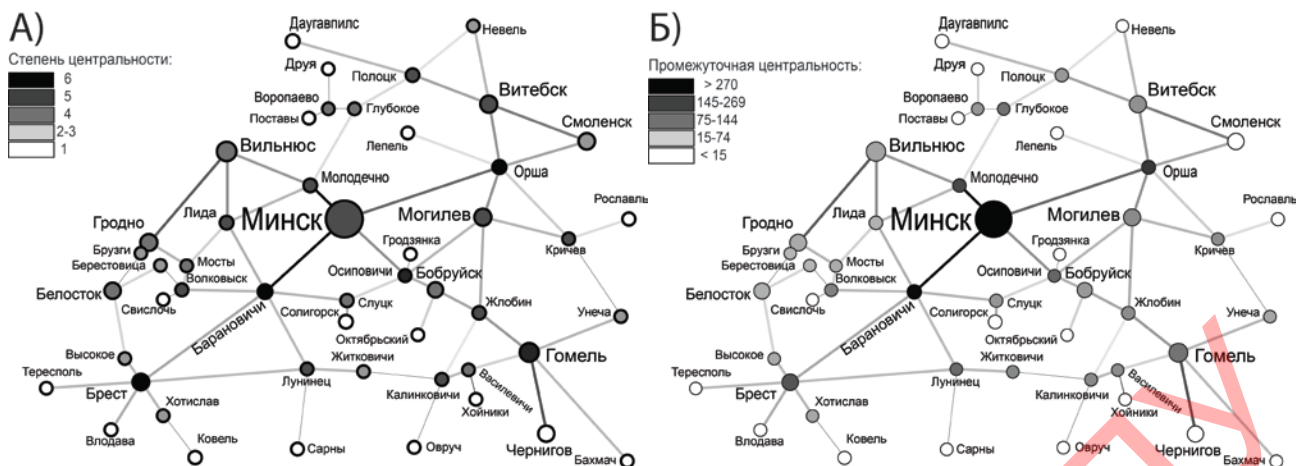


Рисунок 2 – Графы железнодорожной сети Беларуси, отражающие степени центральности (А) и промежуточной центральности узлов (Б)

Одним из результатов исследования явилось получение графа сети железнодорожного транспорта с учетом результатов вычислений модели пространственного взаимодействия транспортных узлов (гравитационной модели). Структура пар транспортных узлов по силе гравитационного притяжения характеризуется следующими значениями. При вариации значений от 0,01 до 22,64 из 66 пар связанных населенных пунктов лишь 5 (7,6 %) имеют значение величины гравитационного притяжения, превышающее 10 (наибольшей силой пространственного взаимодействия характеризуются пары городов Минск-Молодечно (22,64) и Минск-Барановичи (22,07)). В данном случае необходимо иметь в виду доминирование фактора притяжения г. Минска – самого крупного по численности населения города Беларуси – над фактором расстояния. Средние величины данного индикатора (от 2 до 9) характерны для 14 пар узлов сети (21,2 %, при наибольшем значении у пары Витебск-Смоленск). Остальные населенные пункты сети железнодорожного сообщения, образующие 47 связанных пар (71,2 %), имеют значения гравитационного притяжения, не превышающие 2 (минимальное значение имеет пара узлов Воропаево-Друя).

Заключение. Применение теории графов для построения и анализа железнодорожной сети Республики Беларусь вместе с расчетами по гравитационной модели выявило ряд пространственных аспектов конфигурации сети. Во-первых, анализ связности показал среднюю степень завершенности графа сети согласно значениям γ и β индексов (0,46 и 1,32 соответственно). Значение индекса α (0,19) свидетельствует о невысокой степени

связности сети и о наличии потенциала для ее развития. Во-вторых, анализ степени центральности сети выявил преобладание в структуре транспортных узлов со связностью от 2 до 4 (56 % всех узлов) при наибольшем показателе 6 (5 % всех узлов). Наиболее благоприятными с точки зрения центральности являются следующие транспортные узлы: Барановичи, Брест, Орша. Наименьшее значение степени центральности составляет 1,34 % всех узлов, которые имеют данную степень. Наибольшие значения промежуточной центральности узлов при вариации значений от 0 до 452 коррелируют со значениями степени центральности (из 10 городов с максимальными значениями степени центральности 8 входят в первую десятку городов с высокой промежуточной центральностью). Наибольший показатель данного индикатора характерен для Минска (451,7). В целом в железнодорожной сети Беларуси 9 узлов из 50 (18 %) имеют значение свыше 150, а наибольшая промежуточная центральность характерна для Бреста, Барановичей, Минска, Молодечно, Орши, Лунинца, Глубокого, Гомеля. Преобладают в структуре узлы со значением промежуточной центральности 0–38 %, что свидетельствует о недостаточной центральности железнодорожной транспортной сети Беларуси. В-третьих, анализ территориального взаимодействия транспортных узлов позволил выделить пары с наибольшим потенциалом мобильности населения, косвенно отражающей его экономическую активность. При вариации значений от 0,01 до 22,64 доля населенных пунктов со значением величины гравитационного притяжения свыше 10 составляет лишь 7,6 %. Преобладают в структуре пары с невысоким уровнем территориального притяжения – 71,2 % пар го-

родов имеют значения, не превышающие 2, что свидетельствует о невысокой степени потенциального взаимодействия большинства городов сети. В-четвертых, проведенный анализ позволил выявить потенциальные возможности развития железнодорожной транспортной сети Беларуси.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Derrible, S.* Network Analysis of World Subway Systems Using Updated Graph Theory / S. Derrible, C. Kennedy // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2112, Washington, D.C. – 2009. – P. 17–25.
2. *Erath, A.* Graph-Theoretical Analysis of the Swiss Road and Railway Networks Over Time / M. Lochl, A. Erath // Springer Science – Business Media, LLC. – Zurich. – 2008. – P. 380–399.
3. *Kansky, K.* Structure of Transportation Networks : Relationship Between Network Geometry and Regional Characteristics / K. Kansky. – Chicago : University of Chicago Publication. – 1963. – № 86. – P. 156.
4. *Rodrigue, J.P.* The Geography of Transport Systems / J.P. Rodrigue, C. Comtois, B. Slack // Routledge – London. – 2006. – P. 297.
5. Promoting Spatial Development by Creating COMon MINdscapes. Republic of Belarus // BSR INTERREG III B project report. – 2007. – P. 58.
6. *Taaffe, E.J.* Geography of transportation / E.J. Taaffe, H.L. Gauthier, M.E. O’Kelly. – NJ. : Englewood Cliffs. – 2nd edition. – 1996. – P. 470.
7. *Xie, F.* Measuring the structure of road networks / F. Xie et. al // *Geogr. Anal.* – No. 39 (3). – 2007. – P. 336–356.

SUMMARY

The given research is dedicated to the implementation of graph-network analysis in investigation of the regional transport systems. The graph of Belarusian railways network had been designed and analyzed according to “Gephi 0.8.1. beta” software. Basic metric network characteristics, which determinate specific features of network structure and development had been calculated. Central network nodes had been detected due to gravity model implementation. Railway transport nodes classification had been developed according to the degree of their centrality.

Поступила в редакцию 14.02.2013 г.

Репозіторій