

УДК: 524.94

DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-556-567

А.М. Карпачевский¹, Г.С. Титов², Н.И. Тульская³, А.И. Прасолова⁴

ОПЫТ СЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ПО МАГИСТРАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕТЯМ

АННОТАЦИЯ

Пространственные базы данных по географическим, в т. ч. электрическим сетям имеют широкое распространение уже около двух десятков лет. Вместе с тем временная составляющая данных, которую можно использовать для анализа развития сети не имеет каких-либо устоявшихся способов хранения и редактирования. Уникальная в своем роде пространственно-временная база данных по магистральным электрическим сетям московской энергосистемы ранее была собрана на основе разных источников информации и опубликована в виде картографического веб-сервиса. В настоящем исследовании рассматриваются некоторые возможности расчета показателей, в том числе с использованием методов сетевого анализа, для их дальнейшего картографирования. Для корректного представления данных на каждый год за изучаемый период с 1936 по 2020 год разработаны алгоритмы для проверки целостности данных, а также для автоматизированного создания топологически корректной сетевой модели. Приведение сети к топологически корректному виду подразумевает притягивание концевых вершин линий к точечным объектам энергосистемы, ликвидацию висячих сегментов линий, а также ликвидацию самопересечений. Проверка целостности осуществляется в три этапа: 1) согласование временных рамок существования сегментов сети; 2) проверка связности каждой линии электропередач за каждый временной срез; 3) проверка связности всей сети целиком за каждый год. Возраст сети, центральность по промежуточности, электросетевая центральность, центральность по близости в данной работе взяты в качестве примера локальных показателей, т. е. показателей, приуроченных к конкретным элементам сети (ребрам или вершинам). Кроме того, рассмотрен глобальный показатель, характеризующий сети в целом – средний кратчайший путь в сети, который может быть рассчитан тремя способами: без учета веса, с учетом длины линий или с учетом ее емкостных характеристик, зависящих от напряжения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: веб-сервис, географические сети, сетевой анализ, топологическая модель, целостность данных

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: karpach-am@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: titovgs@my.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: tnadya@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: prasolova.geo@yandex.ru

Andrey M. Karpachevskiy¹, German S. Titov², Nadezhda I. Tulsakaya³, Anna I. Prasolova⁴

EXPERIENCE OF NETWORK MODELING AND MAPPING BASED ON SPATIO-TEMPORAL DATABASE ON THE BACKBONE ELECTRIC NETWORKS

ABSTRACT

A unique spatio-temporal database of the backbone electric networks of the Moscow power system was previously based on various information sources and published as a cartographic web service. In this study, we consider some mapping possibilities based on calculated parameters, including network analysis methods. To represent the data correctly for each studied year from 1936 to 2020, we have developed algorithms for verifying data integrity, as well as for automated creation of a topologically correct network model. Bringing the network to a topologically correct form implies the snapping of the end vertices of the lines to the point objects of the power system, the elimination of hanging dangles, as well as the elimination of self-intersections. The integrity check is carried out in three stages: 1) coordination of the time frame for the existence of network segments; 2) checking the connectivity of each power line for each time slice; 3) checking the connectivity of the entire network as a whole for each year. The age of the network, betweenness centrality, electric grid centrality, closeness centrality in this paper are taken as an example of local parameters, i. e. indicators confined to specific elements of the network (edges or vertices). In addition, we have considered a global indicator characterizing the network as a whole – the average shortest path in the network, which can be calculated in three ways: without taking into account the weight, taking into account the length of the lines or taking into account its capacitance characteristics, depending on voltage.

KEYWORDS: web service, geographic networks, network analysis, topological model, data integrity

ВВЕДЕНИЕ

Электрические сети – сложный объект картографирования в силу особенностей представления линейных объектов. Многие показатели из теории графов имеют свою картографическую и географическую интерпретацию, но подобный опыт для электрических сетей мы находим недостаточным на сегодняшний день. При работе с временной составляющей данных сложность картографического представления усложняетсякратно, а обработка и расчеты показателей требуют высокой степени автоматизации. Автоматизация обработки в свою очередь может быть обеспечена только для данных, которые удовлетворяют критериям целостности [Cockcroft, 1997; Borges et al., 2002].

В таком междисциплинарном направлении как наука о сетях (network science), в частности, в анализе комплексных сетей с конца прошлого века сложилось доминирование физического и статистического принципов моделирования сетей реального мира [Barthelemy, 2018; Newman, 2018], к которым относятся и географические сети. В то же время сама идея изучения географических объектов как сетей принадлежит географам. Одним из ключевых направлений географической науки, опирающихся на сетевую концепцию, стала география транспорта [Haggett, Chorley, 1969; Tapxov, 2005]. На наш

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: karpach-am@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: titovgs@my.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: tnadya@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: prasolova.geo@yandex.ru

взгляд, за последние десятилетия в этой области накопился существенный методический потенциал, обусловленный развитием методов геоинформационного анализа и картографирования, который не реализован в должной мере.

Электрические сети часто становятся объектом изучения в науке о сетях. Изучаются их уязвимость [Pagani, Aiello, 2013; Crucitti et al., 2005; Фаддеев, 2016], близость к модели «тесного мира» [Makrushin, 2017], но практически никогда этот вид географических сетей не рассматривается с привязкой к местности, т. е. с сохранением реальной геометрии сети [Liu et al., 2010; Deka, Vishwanath, 2013; Luo et al., 2018; Rosas-Casals et al., 2018; Buzna et al., 2009]. Это обуславливает слабость развития методов картографирования электрических сетей, в том числе в контексте различных метрик сетевого анализа, а также их пространственно-временного развития и эволюции.

В ранее проведенных исследованиях [Karpachevskiy et al., 2021; Карпачевский, Титов, 2021] была разработана концепция базы пространственно-временных данных по магистральным электрическим сетям России, включая структуры данных и атрибутивных таблиц, а также исходные данные и методы их получения. Актуальной задачей текущего исследования становится разработка принципов создания моделей сети за разные годы на основе созданной ранее базы пространственно-временных данных и картографирование результатов моделирования. Мы рассматриваем модели сети посредством технологии картографического веб-сервиса, обладающего свойствами интерактивности, которая заключается в возможности отображения разных слоев данных на карте, выбора временной составляющей, а также масштабирования карты. Разрабатываемый веб-сервис находится в открытом доступе. Им могут пользоваться как простые пользователи, так и исследователи сетей, на которых рассчитан основной инструментарий сетевого и пространственного анализа сервиса. В будущем на основе данных сервиса и разработанных инструментов станет возможным статистический анализ во времени и пространстве ключевых сетевых и пространственных характеристик электрических сетей, построение графических материалов. Сервис может быть направлен на решение и прикладных проблем, например, инвентаризации и оценки изношенности сети на основе данных по возрасту отдельных участков линий электропередач.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Топологическая коррекция данных. Многовременные пространственные данные об электрических сетях представляют собой линейный класс объектов — сегменты ЛЭП с набором атрибутивных характеристик и временным интервалом существования, а также точечный класс объектов, представляющий собой подстанции, электростанции и иные коммутирующие объекты энергосистемы с их атрибутивными характеристиками и временным интервалом существования. Воздушная ЛЭП начинается и заканчивается на портале или вводе распределительного устройства подстанции или электростанции, т. е. ее геометрия исходно в базе данных не подразумевает соблюдение топологии сети — концевые точки линий не совпадают с точечными объектами энергосистемы.

Для преобразования данных в сетевую модель, которая основана на графовом представлении, необходимо их привести к топологически корректному виду. Данный процесс мы далее будем называть топологизацией, он включает в себя следующие процедуры:

- 1) Притягивание концевых точек линий к соответственным точечным объектам энергосистемы;
- 2) Ликвидация самопересечений линий;
- 3) Ликвидация висячих концов линий, не подключенных к точечным объектам энергосистемы.

Для реализации этих шагов мы использовали скрипт на языке программирования Python с применением библиотеки ArcPy¹. Притягивание концевых точек линий

¹ Что такое ArcPy? Электронный ресурс: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/analyze/arcpy/what-is-arcpy-.htm> (дата обращения 16.05.2022)

к точечным объектам энергосистемы — задача нетривиальная, т. к. она не решается стандартными инструментами ArcGIS, например Snap¹, поскольку радиус поиска в наших данных может быть разным. Недостаточный радиус поиска может привести к тому, что линия не будет присоединена к нужной точке, а избыточный радиус может привести к притягиванию линии не к той точке, либо к притягиванию большого количества промежуточных узлов линии с образованием артефактов сети. Для решения данной проблемы мы разработали свой собственный инструмент, который редактирует координаты концевой вершины, исходя из атрибутивного соответствия названия точечного объекта и названия начального либо конечного пункта в атрибутах линейного объекта.

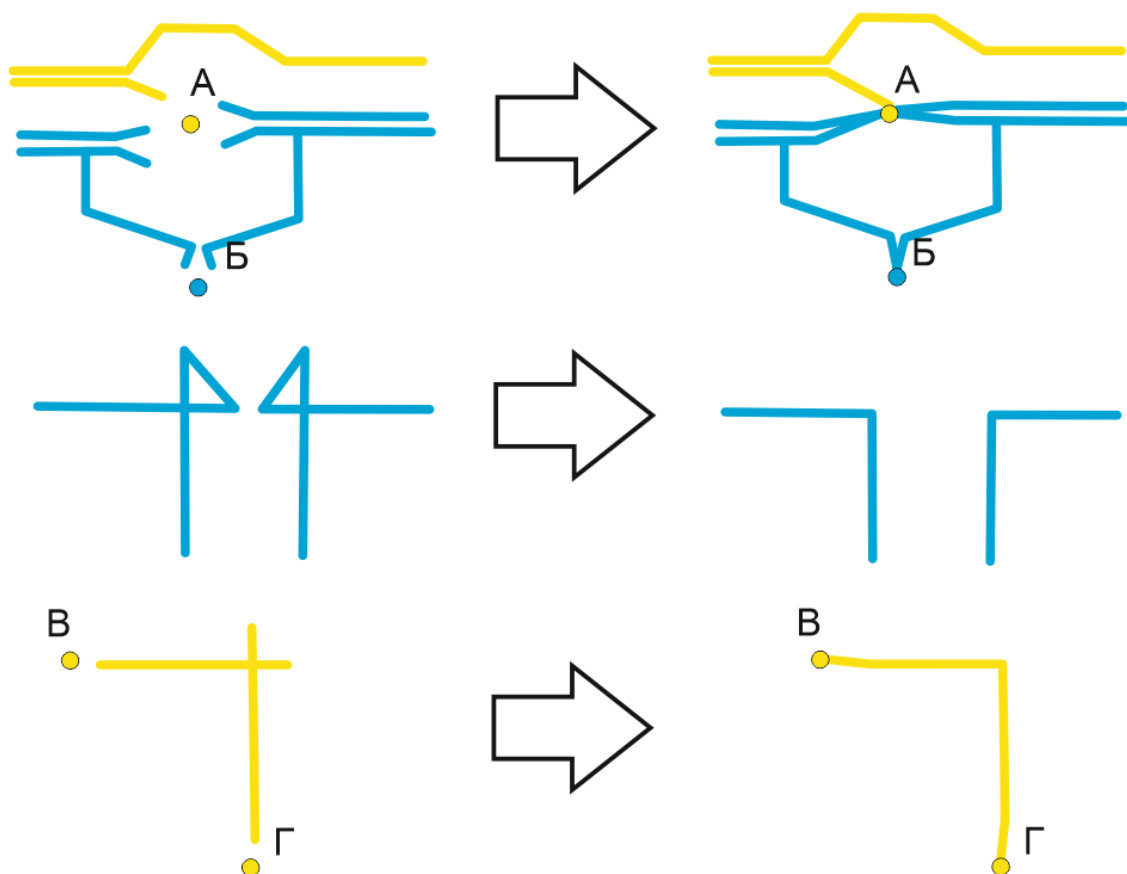


Рис. 1. Схематичные примеры топологизации: притягивание концевых точек линий к соответственным точечным объектам энергосистемы, ликвидация самопересечений линий (петель), ликвидация висячих концов линий

Fig. 1. Schematic examples of topologization: snapping of the end vertices of lines to the corresponding point objects of the power system, elimination of self-intersections of lines (loops), elimination of hanging dangles of lines

После проделанной процедуры можно избавиться от всех висячих сегментов линии, так как они не будут присоединены к точечным объектам. К таким сегментам могут относиться отдельные участки отпаек (ответвлений) воздушных линий, некоторые конфигурации заходов разрезок, а также иные элементы топоморфологических отношений в сети.

Самопересечения часто имеют место при переходе линии из воздушного в кабельное исполнение, либо при заходах некоторых разрезок сети. Избавиться от самопересе-

¹ Справка инструмента Snap. Электронный ресурс: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/editing-toolbox/snap.htm> (дата обращения 16.05.2022)

чений можно через удаление петель. Петля имеет начало и конец в одной точке, следовательно, геометрия и атрибуты концевых точек идентичны.

После топологизации исходной сети за изучаемый год у нас появляется возможность создать граф на основе этих данных и приступить к сетевому анализу. Один из базовых сетевых показателей, доступных для картографирования – электросетевая центральность [Karpachevskiy et al., 2022]. Подобно центральности по промежуточности [Freeman, 1977] этот показатель позволяет ранжировать ребра сети по их важности на основе количества проходящих через каждое ребро кратчайших путей в сети. Отличие заключается в том, что вершины начала и конца искомым кратчайших путей разделены и соответствуют электростанциям (генерирующим объектам) и подстанциям (потребляющим и распределяющим объектам). Таким образом, этот показатель учитывает специфику потоков в электрической сети.

Проверка целостности данных. Прежде чем приступить к анализу сети, необходимо убедиться в целостности данных, т. е. отсутствии ошибок, которые могут привести к некорректной сборке сети за конкретный год. В атрибутивной таблице (табл. 1) присутствуют колонки Year_start и Year_end, фиксирующие временные рамки существования данного сегмента линии. Если сегмент линии был построен и действует до сих пор, то в колонке Year_end указывается значение “<Null>”. В колонке Name указано название линии, которой принадлежит сегмент в промежуток времени, указанный в свою очередь в колонках Year_start_name и Year_end_name. Это отражает особенность электрических сетей – в разное время один и тот же сегмент может принадлежать линиям с совершенно разными маршрутами. Колонки Start и End хранят информацию о начальном и конечном пункте линии.

Первая проверка на целостность данных подразумевает, что промежутки времени Year_start_name – Year_end_name не должны перекрываться друг с другом для одного сегмента сети, и при этом Year_start_name не может быть меньше, чем Year_start, а Year_end_name не может быть больше, чем Year_end. Если сегмент линии существует до сих пор в качестве составляющей действующей линии, то значение Year_end_name должно быть равно “<Null>”. Таким образом контролируется последовательность смены названия линии, которой принадлежит сегмент, во времени, не допускается таких случаев, когда сегмент линии принадлежит линии, которая уже не существует или еще не существует в рассматриваемый год.

Вторая проверка на целостность данных подразумевает, что каждая линия за каждый рассматриваемый год должна быть представлена связной геометрией, т. е. в ней не должно быть разрывов (нехватящих сегментов). Для проверки этого условия для каждого годового среза осуществляется выборка по уникальному имени линии электропередач из поля Name, после чего с помощью библиотеки NetworkX¹ языка программирования Python создается граф отдельной линии и рассчитывается количество его компонент связности. Для целостной линии количество таких компонент всегда должно быть равно единице.

Третья проверка на целостность работает уже на уровне всей сети. Она позволяет выявить ошибки процедуры топологизации, после которой остались не соединенные с точками линии. Для этого количество компонент связности считается для всей сети, а также проверяется, что координаты вершин графа совпадают с координатами точечных объектов энергосистемы.

¹ Библиотека Python NetworkX. Электронный ресурс: <https://networkx.org/> (дата обращения 16.05.2022)

Табл. 1. Фрагмент таблицы атрибутов, соответствующей
одному геометрическому сегменту сети

Table 1. Fragment of an attribute table corresponding to a single geometric segment

Name	Start	End	Year_start	Year_end	Year_start_name	Year_end_name
ВЛ Новомосковская ГРЭС – Бутырки Б 220 кВ	Новомосковская ГРЭС	Бутырки	1938	<Null>	1938	1940
ВЛ Новомосковская ГРЭС – Восточная 220 кВ	Новомосковская ГРЭС	Восточная	1938	<Null>	1940	1958
ВЛ Новомосковская ГРЭС – Чагино 220 кВ	Новомосковская ГРЭС	Чагино	1938	<Null>	1958	1963
ВЛ Новомосковская ГРЭС – Чагино с отп. 220 кВ	Новомосковская ГРЭС	Чагино	1938	<Null>	1963	1965
ВЛ Каширская ГРЭС – Чагино с отп. 220 кВ	Каширская ГРЭС	Чагино	1938	<Null>	1965	1984
ВЛ Пахра – Чагино 220 кВ	Пахра	Чагино	1938	<Null>	1984	<Null>

Расчет показателей. Ранее была опубликована методика морфологической классификации сети, которая относит участки линии к тем или иным морфологическим элементам, например, участкам строительства заходов разрезок, отпайкам, новым линиям, участкам демонтажа при переустройстве линий и др. [Karpachevskiy et al., 2021].

Второй сюжет картографирования – возраст сети. Для расчета возраста на каждый год из изучаемого периода (1936–2020 гг.) к классу линейных объектов в базе данных осуществлялся SQL-запрос, выбирающий все линии, построенные до текущего года и которые не были демонтированы после текущего года. Разность текущего года и года строительства дает искомый возраст участка сети.

Третий показатель картографирования – центральность по промежуточности для ребер сети на каждый год изучаемого периода, которая рассчитывается с помощью соответствующей функции библиотеки NetworkX. Поскольку расчет данного показателя нормируется на количество вершин в сети, полученные показатели становятся сопоставимы за разные годы.

Четвертый сюжет – электросетевая центральность, которая по своей сути похожа на центральность по промежуточности, но учитывает специфику электрических сетей. Нормирование этого показателя также осуществляется, но на количество подстанций, а не на общее количество вершин.

Пятый показатель – центральность по близости, которая рассчитывается как обратная величина от суммы кратчайших путей до рассматриваемой точки.

Кроме локальных показателей, которые рассчитываются для элементов сети, в сетевом анализе широко распространены глобальные показатели, характеризующие сеть в целом. Естественно, что такие показатели не картографируются, но с точки зрения интерпретации становятся интересными изменения таких показателей с течением времени. Например, средняя длина пути в сети характеризует ее связность. Чем длиннее средняя длина пути, тем больше сеть по размеру и тем меньше ее связность. Для электрических

сетей нет однозначного понимания, опираясь на какие единицы следует считать длину пути: это может быть топологический путь – количество промежуточных звеньев в пути, либо путь, рассчитанный на основе геометрии, т. е. по расстоянию, либо путь, рассчитанный на основе пропускной способности сети.

Результаты расчетов глобальных показателей мы представляем в виде графика.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты обработки пространственно-временной базы данных, в частности срезы состояния сети, ее модификации за каждый год, становятся основой для создания картографического веб-приложения. Картографическое приложение включает серверную и клиентскую части. Для сохранности данных на клиентскую часть передаются не исходные пространственные данные, например в виде векторных тайлов, а оформленные картографические тайлы.

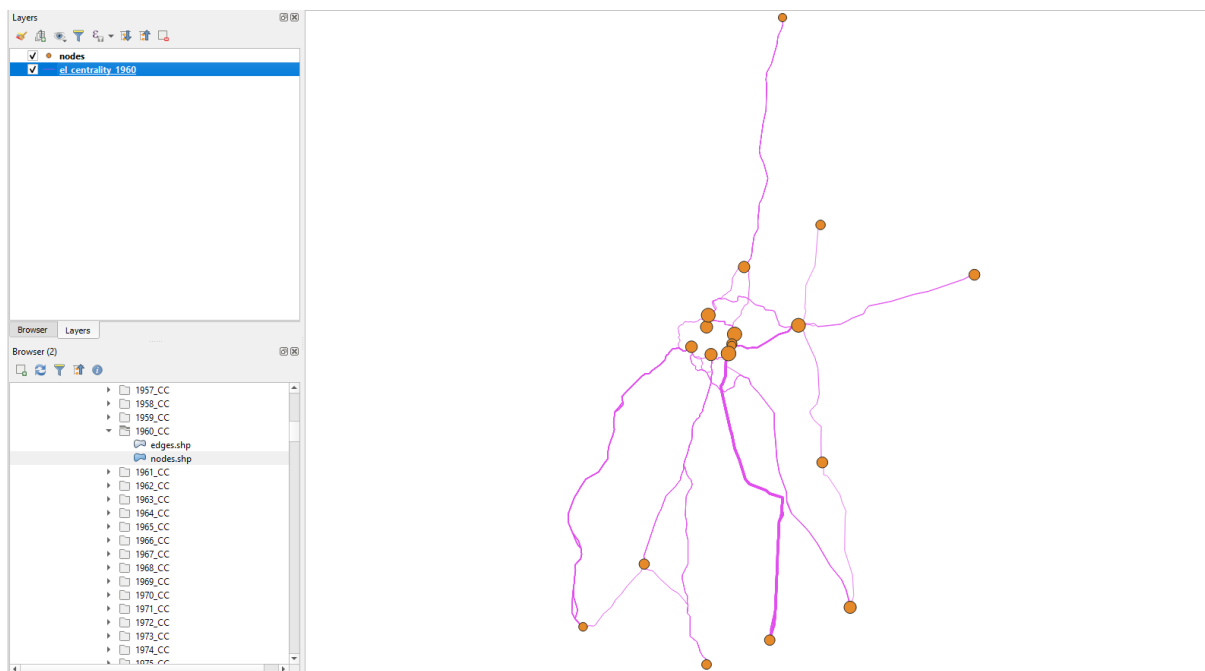


Рис. 2. Внешний вид проекта в QGIS, визуализирующий в абсолютной непрерывной шкале электросетевую центральность для линий и центральность по близости для вершин в 1960 году

Fig. 2. The appearance of the project in QGIS, visualizing in an absolute continuous scale the electrical grid centrality for lines and closeness centrality for vertices in 1960

Серверная часть отвечает за публикацию картографических слоев в виде картографической веб-службы по стандарту Web Map Service (WMS). Исходные данные хранятся в формате GeoPackage — стандартизированном расширении файловой базы данных SQLite для пространственных данных. Файловая база данных предоставляет необходимую для работы веб-сервиса функциональность при сохранении простоты эксплуатации. Для создания картографической веб-службы по стандарту WMS используется QGIS Server. Слои добавляются и оформляются в проекте QGIS (рис. 2). Для каждого слоя и проекта в целом указываются метаданные и устанавливаются настройки, необходимые для публикации слоев по протоколу WMS. В явном виде указывается поле, отвечающее за временное измерение данных. Тайлы, формируемые QGIS Server, кэшируются с помощью MapProxy, чтобы снизить нагрузку на сервер. QGIS Server и MapProxy функционируют в операционной системе Ubuntu с веб-сервером nginx (рис. 3).

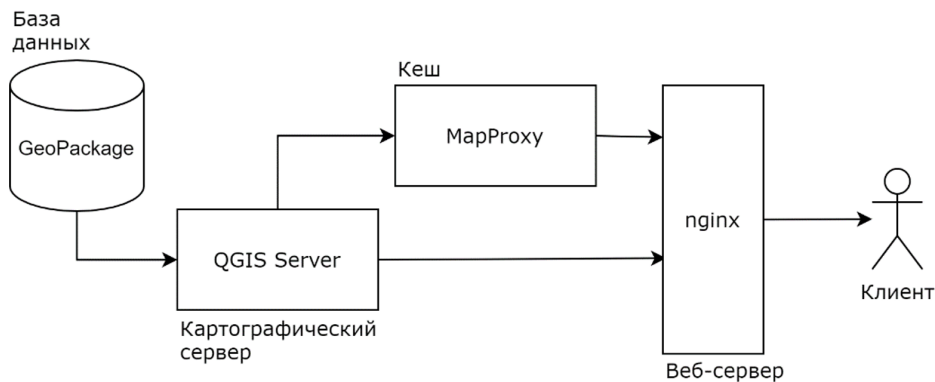


Рис. 3. Серверная часть картографического веб-приложения
 Fig. 3. Server side of the web mapping application

Роль клиентской части выполняет интерактивная веб-карта. Она формируется с помощью картографической библиотеки Leaflet на основе тайлов, поступающих с серверной части. Веб-интерфейс включает: 1) список слоев, 2) слайдер для выбора года, 3) легенду, 4) кнопку переключения языка, 5) метаданные, 6) кнопки управления масштабом (рис. 4). На карте доступны слои напряжения ЛЭП, изменений ЛЭП, возраста ЛЭП, станций и подстанций в соответствии с WMS слоями, предоставляемыми серверной частью приложения. Предоставить пользователю интерактивный элемент для выбора года отображения данных позволяет наличие временного измерения у WMS слоев. Легенда создается вручную и добавляется на веб-карту в виде изображения. Пользователю предлагается веб-карта на русском и английском языке. Картографические слои, транслируемые серверной частью, можно подключить на собственную карту в качестве WMS-слоя. Тогда роль клиентской части будет выполнять пользовательское приложение, например, настольная ГИС-система. Сам ресурс доступен по ссылке¹.



Рис. 4. Элементы веб-интерфейса
 Fig. 4. Elements of the web interface

Пользователю через список слоев доступны визуализации рассмотренных ранее показателей. Например, для линий можно включить слой центральности по промежуточности или электросетевой центральности, которые отображаются непрерывной абсолют-

¹ Эволюция электросетей России. Электронный ресурс: <https://powerlines.one/ru> (дата обращения 16.05.2022)

ной шкалой. Попытки сделать интервальную классификацию не увенчались успехом, поскольку за разные годы интервалы значений получаются очень разными, и, как следствие, это делает невозможным корректное сопоставление величин за разные годы. То же самое касается величин центральности по близости, которые отнесены к точечным объектам. Возраст сети показывается переломной цветовой шкалой с неравными интервалами.

Картографическое веб-приложение на основе результатов обработки пространственно-временной базы данных является основой для визуального анализа динамики состояния магистральных электрических сетей Московского региона. В перспективе веб-ресурс будет дополнен аналитическими инструментами.

Для расчета глобального показателя среднего кратчайшего пути мы использовали три варианта: с учетом длины линии в качестве веса, с учетом пропускной способности ЛЭП, зависящей от напряжения, и без учета весов как таковых. Поскольку результаты вычислений во всех трех случаях получаются совершенно в разных единицах, мы их нормировали на максимальное значение в ряду наблюдений, получив разброс значений от 0 до 1 (рис. 5).

Из графика видно, что вне зависимости от способа расчета кратчайшего пути кривые ведут себя похожим образом. В период с 1936 по 1974 гг. происходит нестабильный, но планомерный рост показателя, после чего он стабилизируется. В дальнейшем рост кривой снова наблюдается с 2006 г. (при условии использования взвешенного кратчайшего пути). Подобный характер кривых можно интерпретировать следующим образом. До середины 1970-х гг. московская энергосистема росла экстенсивно, то есть строились полностью новые линии от пункта начала до пункта конца. С середины 1970-х гг. количество таких линий уменьшается и растет доля иного вида строительства: реконструкции существующих линий, строительство заходов линий на новые подстанции (разрезки) и прочее. Иными словами, сеть перестает расти экстенсивно в пространстве, появляются новые подстанции, которые подключаются к существующей сети. Подобного рода развитие несет в себе повышение рисков для надежной работы энергосистемы. Известная авария на подстанции 500 кВ «Чагино» 2005 года обрела такой масштаб за счет каскадного отключения линий электропередач, которые не выдерживали перегрузки из-за перераспределения потоков электрической мощности. С 2006 года началась реформа энергетики, вновь спровоцировавшая экстенсивное развитие энергосистемы, что и объясняет рост кривых на этом отрезке.

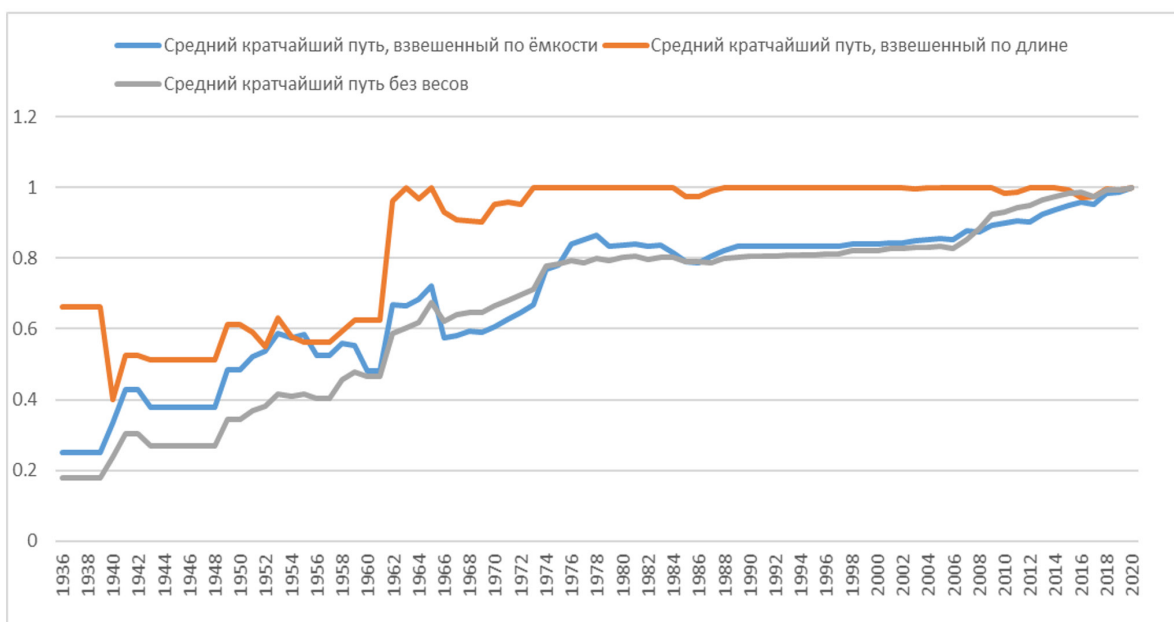


Рис. 5. Изменение глобального показателя среднего кратчайшего пути в сети
Fig. 5. Change in the global parameter of the average shortest path in the network

Падение значений среднего кратчайшего пути характеризует в свою очередь интенсивное развитие энергосистемы, т. е. появление новых связующих линий в сети, которые позволяют сократить путь. Как видно из графика, интенсификация развития энергосистемы за все время существования происходила очень локально, а ее эффект пропал в течение ближайших нескольких лет.

ВЫВОДЫ

Пространственно-временные данные об электрических сетях требуют особого подхода к их сбору, анализу и визуализации. Из-за того что для линейных объектов сети единицей хранения в базе данных становится сегмент линии с идентичными геометрическими, временными и атрибутивными характеристиками, возникает проблема их согласования, что невозможно эффективно делать на основе визуального анализа. Именно для этих целей нами были предложены специальные критерии для проверки целостности данных, которые работают на трех уровнях. В дальнейшем по мере расширения базы данных в пространственном и временном планах вполне возможно, что будут обнаружены ошибки в данных, которые не идентифицируются с помощью предложенных критериев.

Пользователи разработанного веб-сервиса должны иметь в виду, что внутренняя целостность данных не гарантирует отсутствие ошибок в данных, которые могут выражаться в неправильной геометрии сегмента сети, неправильных временных рамках существования той или иной линии, а также просто в наличии или отсутствии какого-либо объекта энергосистемы. Сбор разнородных данных о развитии энергосистемы продолжается.

Разработанный сервис развивается и в функциональном плане – в будущем планируется добавление различных аналитических инструментов, которые позволят исследователям получить новую информацию о развитии магистральных электросетей. Принципиальная возможность реализации подобных инструментов во многом завязана на методы сетевого анализа, которые могут работать лишь с топологически корректной сетью. Именно для этих целей нами был предложен алгоритм, которые из исходного набора данных за каждый изучаемый год позволяет создать сетевую модель путем притягивания конечных вершин линий к точечным объектам энергосистемы, а также через ликвидацию артефактов геометрии, которые мешают корректным расчетам.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации, грант № МК-5343.2021.1.5, также в рамках государственного задания кафедры картографии и геоинформатики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова № 121051400061-9 «Развитие методов и технологий картографии, геоинформатики и аэрокосмического зондирования в исследованиях природы и общества».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Council of Grants of the President of the Russian Federation, grant No. МК-5343.2021.1.5 and was also conducted within the framework of the state-ordered research theme of the Lomonosov Moscow State University, Cartography and Geoinformatics department, No. 121051400061-9 “Development of methods and technologies of cartography, geoinformatics and aerospace sensing in the research of nature and society” .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карпачевский А.М., Титов Г.С.* Проектирование базы пространственно-временных данных о магистральных электрических сетях России. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2021. Т. 27. № 2. С. 306–314. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-306-314.
2. *Тархов С.А.* Эволюционная морфология транспортных сетей. Смоленск: Универсум, 2005. 382 с.

3. *Фаддеев А.М.* Оценка уязвимости энергосистем России, стран ближнего зарубежья и Европы к каскадным авариям. Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2016. №. 1. С. 46–52.
4. *Barthelemy M.* Morphogenesis of Spatial Networks; Lecture Notes in Morphogenesis. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. 331 p. DOI: 10.1007/978-3-319-20565-6.
5. *Borges K.A.V., Davis C.A., Laender A.H.F.* Integrity constraints in spatial databases. Database integrity: challenges and solutions. Database integrity: challenges and solutions. IGI Global, USA, 2002. P. 144–171. DOI: 10.4018/978-1-930708-38-9.CH005.
6. *Buzna L., Issacharoff L., Helbing D.* The Evolution of the Topology of High-Voltage Electricity Networks. IJCIS, 2009. V. 5. No. 1–2. P. 72–85. DOI: 10.1504/IJCIS.2009.02285.
7. *Cockcroft S.* A taxonomy of spatial data integrity constraints. GeoInformatica, 1997. V. 1. No. 4. P. 327–343.
8. *Crucitti P., Latora V., Marchiori M.* Locating critical lines in high-voltage electrical power grids. Fluctuation and Noise Letters, 2005. V. 5. No. 2. P. 201–208. DOI: 10.1142/S0219477505002562.
9. *Deka D., Vishwanath S.* Generative Growth Model for Power Grids. Proceedings of the 2013 International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems, Kyoto, Japan, 2–5 December 2013. P. 591–598.
10. *Freeman L.C.* A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. Sociometry, 1977. V. 40. No. 1. P. 35–41. DOI: 10.2307/3033543.
11. *Haggett P., Chorley R. J.* Network Analysis in Geography. New York: St. Martin's Press, London: Edward Arnold, 1969. 348 p.
12. *Karpachevskiy A., Titov G., Filippova O.* Development of a spatiotemporal database for evolution analysis of the Moscow backbone power grid. Data, 2021. V. 6, No. 12. P. 127–140. DOI: 10.3390/data6120127.
13. *Karpachevskiy A., Filippova O., Kargashin P.* GIS-analysis of the Ural power grid vulnerability to the impact of sleet and wind. GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY, 2022. V. 15. No. 1. P. 14–25. DOI: 10.24057/2071-9388-2021-082.
14. *Liu X., Liu T., Li X.* A Novel Evolving Model for Power Grids. Sci. China Technol. Sci., 2010. V. 53. P. 2862–2866. DOI: 10.1007/s11431-010-4091-4.
15. *Luo L., Han B., Rosas-Casals M.* Network Hierarchy Evolution and System Vulnerability in Power Grids. IEEE Systems Journal, 2018. V. 12. No. 3. P. 2721–2728. DOI: 10.1109/JSYST.2016.2628410.
16. *Makrushin S.* Analysis of Russian Power Transmission Grid Structure: Small World Phenomena Detection. Proceedings of the NET 2016: Models, Algorithms, and Technologies for Network Analysis, 2017. V. 197. P. 107–125. DOI: 10.1007/978-3-319-56829-4_9.
17. *Newman M.E.J.* Networks, 2nd ed. Oxford, UK; New York, NY, USA: Oxford University Press, 2018. 780 p.
18. *Pagani A., Aiello M.* The Power Grid as a complex network: A survey. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2013. V. 392. No. 11. P. 2688–2700. DOI: 10.1016/J.PHYSA.2013.01.023.
19. *Rosas-Casals M., Valverde S., Sole R.* A simple spatiotemporal evolution model of a transmission power grid. IEEE Systems Journal, 2018. V. 12. No. 14. P. 3747–3754. DOI: 10.1109/JSYST.2018.2800766.

REFERENCES

1. *Barthelemy M.* Morphogenesis of Spatial Networks; Lecture Notes in Morphogenesis. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. 331 p. DOI: 10.1007/978-3-319-20565-6.
2. *Borges K.A.V., Davis C.A., Laender A.H.F.* Integrity constraints in spatial databases. Database integrity: challenges and solutions. Database integrity: challenges and solutions. IGI Global, USA, 2002. P. 144–171. DOI: 10.4018/978-1-930708-38-9.CH005.

3. *Buzna L., Issacharoff L., Helbing D.* The Evolution of the Topology of High-Voltage Electricity Networks. *IJCIS*, 2009. V. 5. No. 1–2. P. 72–85. DOI: 10.1504/IJCIS.2009.02285.
4. *Cockcroft S.* A taxonomy of spatial data integrity constraints. *GeoInformatica*, 1997. V. 1. No. 4. P. 327–343.
5. *Crucitti P., Latora V., Marchiori M.* Locating critical lines in high-voltage electrical power grids. *Fluctuation and Noise Letters*, 2005. V. 5. No. 2. P. 201–208. DOI: 10.1142/S0219477505002562.
6. *Deka D., Vishwanath S.* Generative Growth Model for Power Grids. Proceedings of the 2013 International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems, Kyoto, Japan, 2–5 December 2013. P. 591–598.
7. *Faddeev A.* Assessment of vulnerability of power systems of Russia, CIS countries and Europe to cascade accidents. *Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography*, 2016. No. 1. P. 46–52 (in Russian).
8. *Freeman L.C.* A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. *Sociometry*, 1977. V. 40. No. 1. P. 35–41. DOI: 10.2307/3033543.
9. *Haggett P., Chorley R. J.* *Network Analysis in Geography*. New York: St. Martin's Press, London: Edward Arnold, 1969. 348 p.
10. *Karpachevskiy A., Titov G.* Spatio-temporal database design for backbone power grid of Russia. *InterCarto. InterGIS*, 2021. V. 27. No. 2. P. 306–314 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-306-314.
11. *Karpachevskiy A., Titov G., Filippova O.* Development of a spatiotemporal database for evolution analysis of the Moscow backbone power grid. *Data*, 2021. V. 6, No. 12. P. 127–140. DOI: 10.3390/data6120127.
12. *Karpachevskiy A., Filippova O., Kargashin P.* GIS-analysis of the Ural power grid vulnerability to the impact of sleet and wind. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*, 2022. V. 15. No. 1. P. 14–25. DOI: 10.24057/2071-9388-2021-082.
13. *Liu X., Liu T., Li X.* A Novel Evolving Model for Power Grids. *Sci. China Technol. Sci.*, 2010. V. 53. P. 2862–2866. DOI: 10.1007/s11431-010-4091-4.
14. *Luo L., Han B., Rosas-Casals M.* Network Hierarchy Evolution and System Vulnerability in Power Grids. *IEEE Systems Journal*, 2018. V. 12. No. 3. P. 2721–2728. DOI: 10.1109/JSYST.2016.2628410.
15. *Makrushin S.* Analysis of Russian Power Transmission Grid Structure: Small World Phenomena Detection. Proceedings of the NET 2016: Models, Algorithms, and Technologies for Network Analysis, 2017. V. 197. P. 107–125. DOI: 10.1007/978-3-319-56829-4_9.
16. *Newman M.E.J.* *Networks*, 2nd ed. Oxford, UK; New York, NY, USA: Oxford University Press, 2018. 780 p.
17. *Pagani A., Aiello M.* The Power Grid as a complex network: A survey. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2013. V. 392. No. 11. P. 2688–2700. DOI: 10.1016/J.PHYSA.2013.01.023.
18. *Rosas-Casals M., Valverde S., Sole R.* A simple spatiotemporal evolution model of a transmission power grid. *IEEE Systems Journal*, 2018. V. 12. No. 14. P. 3747–3754. DOI: 10.1109/JSYST.2018.2800766.
19. *Tarkhov S. A.* Evolutionary morphology of transport networks. Smolensk: Universum, 2005. 382 p. (in Russian)