

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Карпачевский Андрей Михайлович

**Картографическое обеспечение планирования развития
региональных электрических сетей**

25.00.33 – Картография

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель – *Новаковский Богуслав Августович, доктор географических наук, профессор*

Официальные оппоненты – *Пьянков Сергей Васильевич, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой картографии и геоинформатики ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ)*

Братков Виталий Викторович, доктор географических наук, доцент, заведующий кафедрой географии ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК)

Медведев Андрей Александрович, кандидат географических наук, заведующий лабораторией картографии Института географии Российской академии наук (ИГ РАН)

Защита диссертации состоится «20» декабря 2018 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.11.04 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

E-mail: malyn2006@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/150997336/>

Автореферат разослан «__» ноября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.11.04,
кандидат географических наук



А.Л. Шныпарков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Электросетевой комплекс развивается вместе с ростом потребления электроэнергии населением и промышленностью. Так, только за 2016 год введена в эксплуатацию 71 линия электропередачи (ЛЭП) напряжением 220 кВ и выше [Годовой отчёт за 2016 г. АО «СО ЕЭС»]. Новые ЛЭП строятся не только для передачи электроэнергии новых электростанций конечному потребителю, но и для повышения надёжности энергоснабжения.

Планирование развития электрических сетей не может осуществляться без представления о текущем их состоянии. Наиболее наглядной формой представления состояния электросетевой инфраструктуры является карта, по которой в дальнейшем происходит обоснование вариантов строительства новых связующих ЛЭП между объектами генерации электроэнергии и электрическими подстанциями.

Размещение линейного объекта подразумевает обоснованность не только связи двух существующих пунктов электрической сети, но и конкретной локализации трассы с учётом природных и хозяйственных особенностей территории. Необходимо выявить все существенные территориальные ограничения, которые могут повлиять на прохождение трассы ЛЭП, оценить потенциальное воздействие строительства на окружающую среду, учесть опасные природные явления. В этом случае также наиболее эффективным инструментом становятся карты и геоинформационные технологии.

Таким образом, для принятия решений, касающихся развития электрических сетей, необходимы карты, показывающие их текущее состояние и отражающие факторы, влияющие на размещение трассы новых ЛЭП. На данный момент отсутствует методика, позволяющая картографически обосновать размещение новых ЛЭП, а также отмечается недооценка возможностей геоинформационного анализа.

Цель диссертационной работы. Цель исследования заключается в разработке методики геоинформационно-картографической оценки состояния электрических сетей регионального уровня и картографического обоснования вариантов трасс новых линий электропередач для повышения надёжности энергоснабжения.

Для достижения обозначенной цели необходимо решение следующих теоретических, методических и практических задач:

- изучить пространственные особенности размещения, функционирования и развития электрических сетей, а также опыт их картографического представления;
- рассмотреть специфику взаимодействия объектов в системе «географическая оболочка – ЛЭП»;
- разработать подходы и приёмы геоинформационного моделирования, а также картографического представления пространственных данных,

необходимых для принятия решений при планировании развития электрических сетей;

- разработать технологию обоснования вариантов трассы ЛЭП с учётом сложившейся пространственной структуры энергосистемы, а также географических и экологических особенностей территории;
- апробировать разработанную методику на двух ключевых участках, различных по своему географическому положению и особенностям электрических сетей.

Научная новизна работы. Впервые разработана комплексная методика создания серии карт, обосновывающей развитие электрических сетей регионального уровня. В рамках разработанной методики предложены карты нового содержания: конструктивных особенностей ЛЭП, структурной устойчивости энергоснабжения, климатического осложнения воздушных ЛЭП гололёдными и ветровыми нагрузками.

В работе также систематизированы и обоснованы принципы и методы сбора исходных данных, моделирования ключевых показателей, в т. ч. на основе сетевого анализа, и их представления в базе пространственных данных и на карте.

Объект исследования: электрические сети регионального уровня. **Предмет исследования:** способы представления на карте электрических сетей, их взаимодействия с окружающей средой и методы создания карт соответствующего содержания.

На защиту выносятся следующие положения:

- 1) Разработанная методика геоинформационно-картографической оценки состояния электрических сетей и факторов размещения новых ЛЭП, реализованная в серии карт, позволяет обосновать трассу ЛЭП с учётом природных и хозяйственных ограничений.
- 2) Предложенное в работе совместное использование топологического и топографического подходов картографирования электрических сетей позволяет проводить сетевой геоинформационный анализ и визуализировать электрические сети в виде карт в разных масштабах.
- 3) Совместный геоинформационный анализ структурной устойчивости электрических сетей, выражающейся через нагрузку на ЛЭП, и климатических факторов – через коэффициент климатического осложнения, позволяет выявить наиболее критичные при аварийной ситуации участки сети.
- 4) Видовой состав опор ЛЭП – комплексная характеристика, позволяющая распознавать ЛЭП на космических снимках очень высокого и сверхвысокого пространственного разрешения и обуславливающая свойства отдельных участков сети (конструктивные особенности, изношенность и размер охранной зоны), которые выступают единицей в топографическом подходе к картографированию электрических сетей.

Методы исследования. Диссертационное исследование основано на фундаментальных работах в области картографии и геоинформатики, географии, а также специализированной литературе электроэнергетической тематики. В рамках работы использованы картографический, аэрокосмический, геоинформационный методы, методы математической статистики и теории графов.

Картографическая составляющая исследования базируется на работах К. А. Салищева, А. М. Берлянта, А. А. Лютого, С. В. Чистова, Е. А. Прохоровой, П. Е. Каргашина. Применение аэрокосмических методов базируется на работах Ю. Ф. Книжникова, Б. А. Новаковского, И. А. Лабутиной, Е. А. Балдиной. Геоинформационная составляющая исследования основана на работах И. К. Лурье, В. С. Тикунова, Б. А. Новаковского. Географическая составляющая опирается на физико- и экономико-географические работы С. А. Тархова, А. М. Фаддеева, А. Г. Исаченко, Г. В. Бастракова, В. Ф. Перова, О. А. Подрезова, Ю. Г. Симонова, В. А. Николаева.

В основе диссертации лежат авторские исследования в период с 2012 по 2018 гг., выполненные в рамках работ в лаборатории цифровой картографии и фотограмметрии кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

Использованные материалы. В качестве источников данных исследования были использованы:

- 1) мозаики снимков очень высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, предоставляемые открытыми картографическими веб-сервисами;
- 2) геопортал Ситуационно-аналитического центра министерства энергетики РФ, а также портал электросетевых услуг ПАО «Россети»;
- 3) схемы и программы развития электроэнергетики Краснодарского края и Ленинградской области;
- 4) многолетние климатические данные по метеорологическим станциям Краснодарского края;
- 5) государственная геологическая карта масштаба 1:200 000;
- 6) топографические карты масштаба 1:100 000, а также открытые данные OpenStreetMap.

В рамках текущего исследования был выбран ГИС-пакет ArcGIS 10.5, обладающий широкими возможностями сетевого моделирования, пространственного анализа и картографической визуализации.

Практическая значимость. Совершенствование электросетевой инфраструктуры стратегически важно для России, поскольку является необходимым условием социально-экономического развития территории. Существенным ограничивающим фактором при планировании развития электрических сетей и проектировании ЛЭП остаётся несовершенство методической базы, опирающейся на картографический метод.

Разработанная в рамках данного исследования методика позволяет повысить эффективность мероприятий по предварительному проектированию ЛЭП. Это обеспечивается благодаря новому картографическому подходу к анализу существующей пространственной структуры электрической сети и учёту природных особенностей, а также новому принципу сбора и представления пространственной информации о существующих объектах электросетевой инфраструктуры.

Внедрение. Отдельные результаты исследования реализованы в рамках проекта «Информационные материалы для включения в пояснительную записку эскизного проекта на создание Государственной информационной системы обеспечения потребителей данными ДЗЗ из космоса (ГИС ОПД ДЗЗ)» и гранта РФФИ 17-05-41115 «Создание геоинформационно-картографического обеспечения для оценки состояния и функционирования транспортной системы России (РФФИ-РГО)».

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались на российских и международных конференциях: Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2013» (Москва, 2013); XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2014» (Москва, 2014), V Российская молодёжная научно-практическая Школа с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2015), Международная конференция «ИнтерКарто/ИнтерГИС-22. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий в условиях глобальных изменений климата» (Протвино, 2016), XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2017» (Москва, 2017), 10-я международная молодежная школа-конференция «Меридиан»: Современные подходы к изучению экологических проблем в физической и социально-экономической географии (Курск, 2017), II Международная научно-практическая конференция «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения» (Санкт-Петербург, 2017).

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 4 статьи в журналах из списка RSCI Web of Science, 5 статей – в журналах из перечня ВАК.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка терминов, списка литературы, списка иллюстраций и приложений. Список литературы содержит 142 наименования, в том числе 104 на русском и 38 на иностранном языке. Основной текст работы изложен на 119 страницах машинописного текста. Работа содержит 33 рисунка, 8 таблиц. Приложения включают 18 карт и 6 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю проф., д.г.н. Б. А. Новаковскому, а также сотрудникам лаборатории цифровой картографии и фотограмметрии: к.г.н. П. Е. Каргашину, А. И. Прасоловой, Н. И. Тульской, М. В. Кусильман за ценные советы и

рекомендации. Автор признателен сотрудникам кафедры картографии и геоинформатики, включая заведующую кафедрой проф., д.г.н. И. К. Лурье, д.г.н. В. И. Кравцовой, к.г.н. Л. А. Ушаковой, к.г.н. С. В. Чистову, к.г.н. Е. А. Прохоровой, к.г.н. Т. Е. Самсонову, за конструктивные замечания и профессиональные советы. Автор благодарит за консультации сотрудников географического факультета: к.г.н. В. Р. Беляева, И. В. Мироненко, сотрудников ПАО «Научно-технический центра Федеральной сетевой компании единой энергосистемы» А. В. Москалёва, В. М. Володина, а также О. Г. Филиппову за помощь в рамках студенческой научно-исследовательской работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Электрические сети: функционирование, проектирование, картографирование

Линии электропередач (ЛЭП) выполняют транспортную и распределительную функцию, передавая конечному потребителю выработанную на электростанциях электроэнергию. В зависимости от передаваемой мощности и расстояния используются ЛЭП разных классов напряжения, которые подразделяются на *магистральные* (220 кВ и выше) и *распределительные* (ниже 220 кВ). В инфраструктуру электрических сетей также входят электростанции, электрические подстанции (ПС), распределительные подстанции, переходные и секционирующие пункты, закорачивающие пункты плавки гололёда. Ключевая пространственная составляющая воздушной ЛЭП (ВЛ) – *трасса*. ЛЭП могут быть *одноцепными*, *двухцепными* (ЛЭП с совмещённой подвеской двух цепей на опорах) и *многоцепными*. Территориально электрические сети объединяются в энергосистемы, которые либо работают синхронно, либо изолированы друг от друга, состоят из энергорайонов и энергоузлов (рисунок 1).

Картографические произведения, которые используются при планировании развития электрических сетей и предварительном проектировании ЛЭП, можно подразделить на карты собственно электрических сетей и карты, где электрические сети выступают в качестве субъекта картографической оценки. В качестве нового сюжета при картографировании электрических сетей следует отметить карты пространственной структуры энергосистемы [Фаддеев, 2016]. Анализ топологии сети, т. е. взаиморасположения и взаимосвязей между элементами сети, позволяет оценить устойчивость энергосистемы, выявить наиболее уязвимые узлы и предлагать пути повышения надёжности энергоснабжения. Однако на данный момент картографирование структурных показателей сети практически никак не представлено ни в России, ни за рубежом, хотя по моделированию структурной устойчивости опубликовано значительное количество работ.

Тематическое картографирование условий окружающей среды, которые необходимо учитывать при планировании развития электрических сетей, можно подразделить на три основных направления: *инженерно-климатическое*,

картографирование санитарных и хозяйственных ограничений и картографирование потенциального воздействия на окружающую среду при строительстве ЛЭП.



Рисунок 1 – Карта энергосистем России (составлено автором)

Особое направление геоинформационного моделирования, использующееся при обосновании вариантов трасс ЛЭП – поиск пути с минимальными издержками. Первые работы, посвящённые автоматизированному изысканию трасс ЛЭП, относились к кабельным линиям в городской черте и реализовывались на векторном графе улиц [Summic, Venkata, Pimorese, 1993; Lin, Tsay, Wu, 1995]. Сейчас поиск пути с минимальными издержками осуществляется на основе растровой модели – *поверхности стоимости*. Стоимость может быть выражена как в реальных денежных единицах, так и в условных баллах [EPRI-GTC Overhead Electric Transmission Line Siting Methodology, 2006]. Поверхность стоимости получается в результате сложения всех территориальных осложнений и ограничений. Веса всех факторов определяются *заинтересованными сторонами* при проектировании линейного объекта – тем самым достигается многовариантность размещения трассы ЛЭП.

Глава 2. Моделирование факторов размещения ЛЭП

Распознавание воздушных ЛЭП по аэрокосмическим снимкам. Первичной задачей при планировании развития электрических сетей является

сбор данных о существующих электрических сетях путём дешифрирования аэрокосмических снимков очень высокого и сверхвысокого пространственного разрешения. При распознавании электрических сетей по космическим снимкам может использоваться два подхода. При *топографическом подходе* ЛЭП будет представляться как единый объект, вне зависимости от количества цепей, идущих параллельно и выражающихся в данном масштабе картографирования. При этом на карте количество цепей может показываться как свойство ЛЭП. При *топологическом подходе* в качестве единицы картографирования будет выступать цепь. Вне зависимости от количества цепей, размещённых на общих опорах, каждая цепь будет показываться отдельно. Такое представление позволяет не только визуально анализировать сеть, но и существенно расширяет возможности структурного и сетевого анализа.

Важнейшей комплексной характеристикой, распознаваемой по аэрокосмическим снимкам, является *видовой состав опор*, под которым понимается закономерное сочетание видов анкерных, угловых и промежуточных опор на участке воздушной линии (ВЛ). Зачастую одна и та же цепь имеет участки с опорами разного вида, что обусловлено особенностями пространственно-временного развития сети. Эти особенности проявляются в пространственных конфигурациях электрических сетей. Повторяющиеся пространственные конфигурации мы называем *топоморфологическими отношениями* [Каргашин и др., 2016].

Распознавание по снимкам топоморфологических отношений в сетях позволяет сформулировать требования к их отображению на карте. Важнейшей особенностью ЛЭП является «коридорность», то есть размещение сразу нескольких линий параллельно [Новаковский, Карпачевский, Каргашин, 2017]. Участки ВЛ в таких коридорах могут описываться разными свойствами (напряжение, цепность, время строительства), на них могут накладываться различные топоморфологические отношения, что обуславливает необходимость сохранения конфигурации сети при переходе к более мелкому масштабу. Это достигается в основном приёмами сдвига и утрирования.

Сетевое моделирование при картографировании структуры электрических сетей. Преимуществом топологического подхода является возможность конструирования сетевой модели, на основе которой проводится сетевой геоинформационный анализ. Сетевой анализ, базируясь на понятиях из теории графов, даёт возможность оценивать структурную устойчивость сети. Сетевой анализ в геоинформационной среде удобен в том плане, что позволяет результаты анализа визуализировать в виде карты и переходить к совместному анализу электрических сетей с другими пространственными объектами и явлениями [Новаковский и др., 2017].

Основная типовая задача, используемая в рамках анализа структуры энергосистемы – поиск ближайшей точки источника, где в качестве источников выступают питающие центры (электростанции). Кратчайший маршрут рассчитывается от каждой ПС, в результате чего мы получаем выходной слой

маршрутов, где каждой ЛЭП соответствует аккумулированная стоимость перемещения от электростанции до подстанции (ПС). По сути, эта величина соответствует транспортной доступности пункта, которая рассчитывается исходя из пропускной способности ЛЭП. Чем ниже доступность электростанции, т. е. её *топологическая удалённость*, тем выше вероятность, что одна из ЛЭП, составляющих маршрут, будет отключена в результате аварийной ситуации. Количество проходящих через одну ЛЭП (ребро) маршрутов соответствует *центральности*, т. е. нагрузке на ЛЭП. *Альтернативность* ПС обозначает количество подключенных к ней ЛЭП, по которым осуществляется передача электроэнергии от питающих центров.

Моделирование климатических нагрузок. Такие климатические показатели, как максимальная скорость ветра и максимальная толщина стенки гололёда, вероятные 1 раз в 25 лет, всегда учитываются при проектировании ВЛ. Эти показатели определяются не только данными гидрометеостанций, но и рельефом местности. В существующих методических указаниях [Методические указания по расчету климатических нагрузок в соответствии с ПУЭ-7 и построению карт климатической нагрузки, 2010] по составлению карт климатических нагрузок на ЛЭП выявляются логические ошибки и слабо обоснованные критерии, не соответствующие общепринятым классификациям форм рельефа. Это ведёт к потере географической достоверности моделирования.

В данном исследовании в основу расчёта климатических нагрузок были положены показатели *нормализованной высоты* (относительный показатель от 0 у подножья склона до 1 у его вершины) [Новаковский, Каргашин, Карпачевский, 2016], *общей защищённости от ветров преобладающих направлений* (соотношение преобладающих ветров и экспозиции склонов), удалённости от морей, углов наклона. Для учёта пространственной вариации климатических показателей используется пространственно взвешенная регрессия, которая позволяет моделировать пространственные вариации явления в зависимости от факторов, значения которых локализованы в точках (метеостанциях).

Моделирование хозяйственных и санитарных ограничений для строительства. Их расчёт и моделирование осуществляется на основе нормативно-правовых актов. Запрет на размещение новых ВЛ распространяется на особо охраняемые природные территории, населённые пункты, поверхность ограничения аэродромов, места добычи полезных ископаемых, объекты культурного наследия, а также соответствующие им охранные зоны.

Немаловажную роль при оценке территории с точки зрения возможности размещения новых ВЛ играют существующие линейные объекты электрических и трубопроводных сетей, автомобильных и железных дорог. Для формализации описания этих объектов при дальнейшем геоинформационном анализе и поиске пути наименьших издержек использовался *принцип построения трёх буферных зон* вдоль существующих линейных объектов. Первая зона соответствует расстоянию допустимого сближения при пересечении с другой ВЛ. Вторая зона соответствует полосе возможного параллельного следования проектируемой и

существующей ВЛ в стеснённых условиях. Третья зона позволяет минимизировать землеотвод через наложение охранных зон. Одновременно с этим она благоприятна по расстоянию от существующей зоны. Размеры этих зон определяются напряжением ВЛ и видовым составом опор [Новаковский, Каргашин, Карпачевский, 2017].

Моделирование потенциального воздействия на окружающую среду при строительстве и эксплуатации ВЛ. Потенциальное воздействие включает в себя активизацию эрозии, заболачивание, фрагментацию природно-территориального комплекса (ПТК) просеками ЛЭП. В связи с этим в качестве исходных данных для оценки территории в данном аспекте необходимы геологические карты (карты четвертичных отложений), цифровые модели рельефа и производные от них показатели (углы наклона, профильная кривизна, эрозионный потенциал), а также данные о состоянии лесных массивов, которые характеризуют степень нарушенности ПТК. В качестве единиц картографирования могут выступать как собственно ПТК, так и водосборные бассейны, например, для горных территорий. Для получения картографической оценки опасности потенциального воздействия на природную среду используется балльное ранжирование отдельных факторов.

Общая схема методики картографического обоснования трассы новой ВЛ. Все описанные выше факторы размещения новых ЛЭП визуализируются в виде серии карт и последовательно анализируются для получения итоговой карты вариантов размещения трасс ЛЭП (рисунок 2). На первом этапе осуществляется инвентаризация данных о существующих электрических сетях, а также сетевой анализ их пространственной структуры (блок А, ограниченный пунктирной линией). На структурную устойчивость сети накладывается климатическая нагрузка, что позволяет выявить те ВЛ, на которых наиболее вероятны аварийные ситуации и вывод из строя которых существенно повлияет на надёжность энергоснабжения конечных потребителей. Подобный комплексный анализ позволяет наметить маршруты новых линий для повышения надёжности энергоснабжения.

Конкретные варианты размещения трасс планируемых ЛЭП рассматриваются через призму карт из блока Б схемы (климатическая нагрузка, санитарные и хозяйственные ограничения, потенциальное воздействие на окружающую среду). Совмещение этих факторов позволяет картографически обосновать варианты размещения трассы ЛЭП.

Глава 3. Составление серии карт для оценки состояния существующих электрических сетей и обосновании размещения новых воздушных ЛЭП

Для апробации разработанной методики были выбраны два ключевых участка: запад Ленинградской области и запад Краснодарского края. Оба ключевых участка представляют собой освоенную в хозяйственном плане территорию с большим количеством существующих транспортных путей и коммуникаций, населённых пунктов и зон с особыми условиями использования территории.

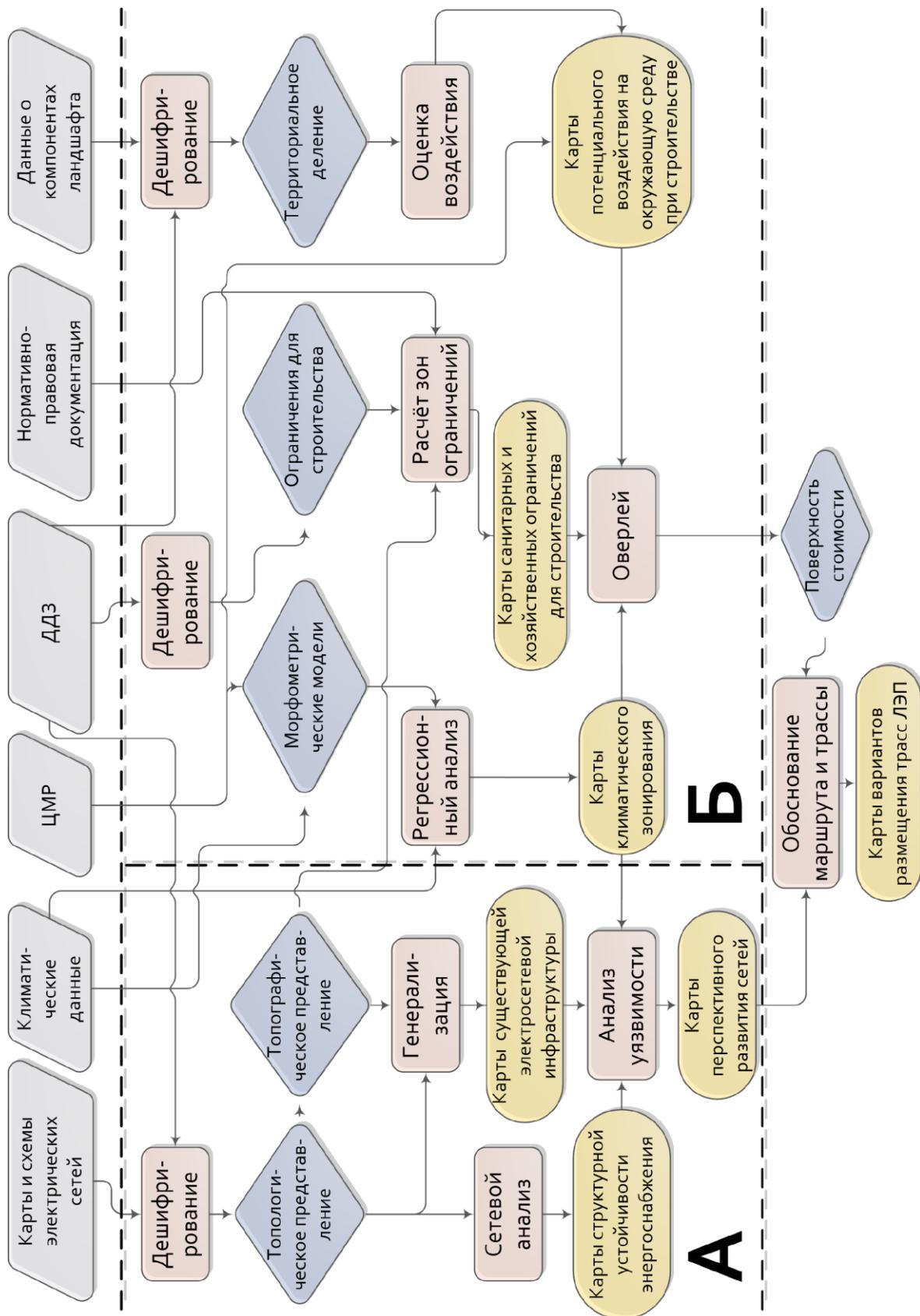


Рисунок 2 – Общая схема методики создания картографического обеспечения при планировании развития электрических сетей регионального уровня; серыми фигурами показаны исходные данные, красными – методы и алгоритмы, сиреневыми – промежуточные модели, жёлтыми – карты

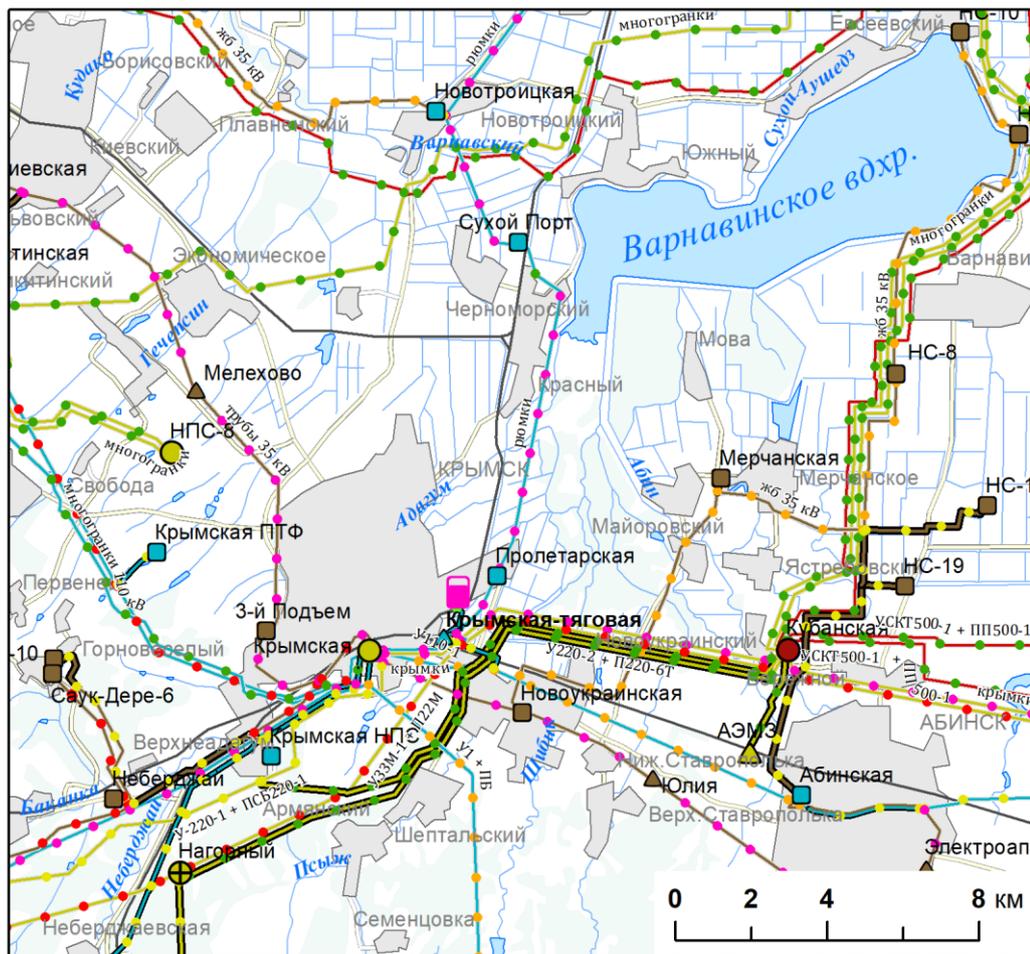
Наиболее существенное различие ключевых участков касается климатических условий. Эффект горного хребта Кавказа на втором ключевом участке обуславливает значительную пространственную вариацию показателей максимальной скорости ветра и толщины гололёдных отложений. В то же время для ключевого участка в Ленинградской области нет сколько-либо серьёзных различий в климатических характеристиках. Подобные отличия в климатических условиях влияют на итоговый состав серии карт, используемых при обосновании вариантов развития электрических сетей.

Существующая электросетевая инфраструктура рассматриваемых ключевых участков также значительно различается. Во-первых, на втором ключевом участке отсутствуют объекты генерации большой мощности, что повышает роль межсистемных связей с соседними энергосистемами. Во-вторых, рассматриваемые ключевые участки относятся к разным шкалам применяемых напряжений в магистральных сетях. Ленинградская область представлена сетями 750 и 330 кВ (220 кВ тоже присутствует, но в гораздо меньшем количестве), Краснодарский край представлен сетями 500 и 220 кВ.

На обозначенные ключевые участки были составлены карты *электрических сетей* и *конструкционных особенностей ЛЭП* в масштабе 1:200 000. Сбор исходных данных осуществлялся путём векторизации трасс ЛЭП по космическим снимкам в программе Google Earth в формате KML, которые затем были конвертированы в формат базы геоданных ArcGIS. Для карт существующих электросетей был применён топологический подход при картографировании, что позволяет сохранить возможность проследить трассу каждой цепи. Участки параллельного следования нескольких цепей потребовали генерализации, заключающейся в искусственном раздвигании параллельных цепей на расстояние не менее 150 м (0,8 мм в масштабе карты).

На картах конструкционных особенностей ЛЭП применён топографический подход, т. к. в качестве объекта картографирования выступают участки однородного видового состава опор. Таким образом, видовой состав опор является единой характеристикой для всех цепей, которые размещены на одних общих опорах. Двухцепные и многоцепные участки представлены в виде одной линии, что упрощает процесс генерализации. Сопоставление космических снимков, фотографий, панорам в общедоступных веб-сервисах и типовых проектов опор позволяет определить время строительства участков сети, что показано цветом наложенного на участки пунктира (рисунок 3).

На основе топологической модели был проведён сетевой анализ существующих электрических сетей, сопровождающийся расчётом показателей центральности, топологической удалённости и альтернативности. Первый показатель привязывается к цепям ЛЭП, остальные два рассчитываются для каждой ПС. Показатели, локализованные в точках ПС, привязываются к зонам их обслуживания, полученные путём построения диаграммы Вороного.



Напря- жение, кВ	ЛЭП		Подстанции		Пункты Переключательные	Время строи- тельства ЛЭП
	Одно- цепные	Двух- цепные	ФСК ЕЭС	Кубань- Абонент- ские		
500						
220						
110						
35						
У220-2 + П220-6Т		Видовой состав опор ЛЭП			Тепловые электростанции	
Крымская-тяговая		Тяговые подстанции железной дороги				

Рисунок 3 – Фрагмент карты конструктивных особенностей электрических сетей запада Краснодарского края

На карте *структурной устойчивости энергоснабжения* (рисунок 4) были совмещены три упомянутых показателя. Топологическая удалённость и альтернативность показываются вместе количественным фоном, которому соответствует матричная легенда. Центральность показывается толщиной линии. Из исходного набора точечных данных были исключены абонентские подстанции, поскольку они предназначены для электроснабжения определённых предприятий, в частности, железной дороги. На полученный слой была наложена маска ненаселённых территорий, где инфраструктура энергоснабжения отсутствует.

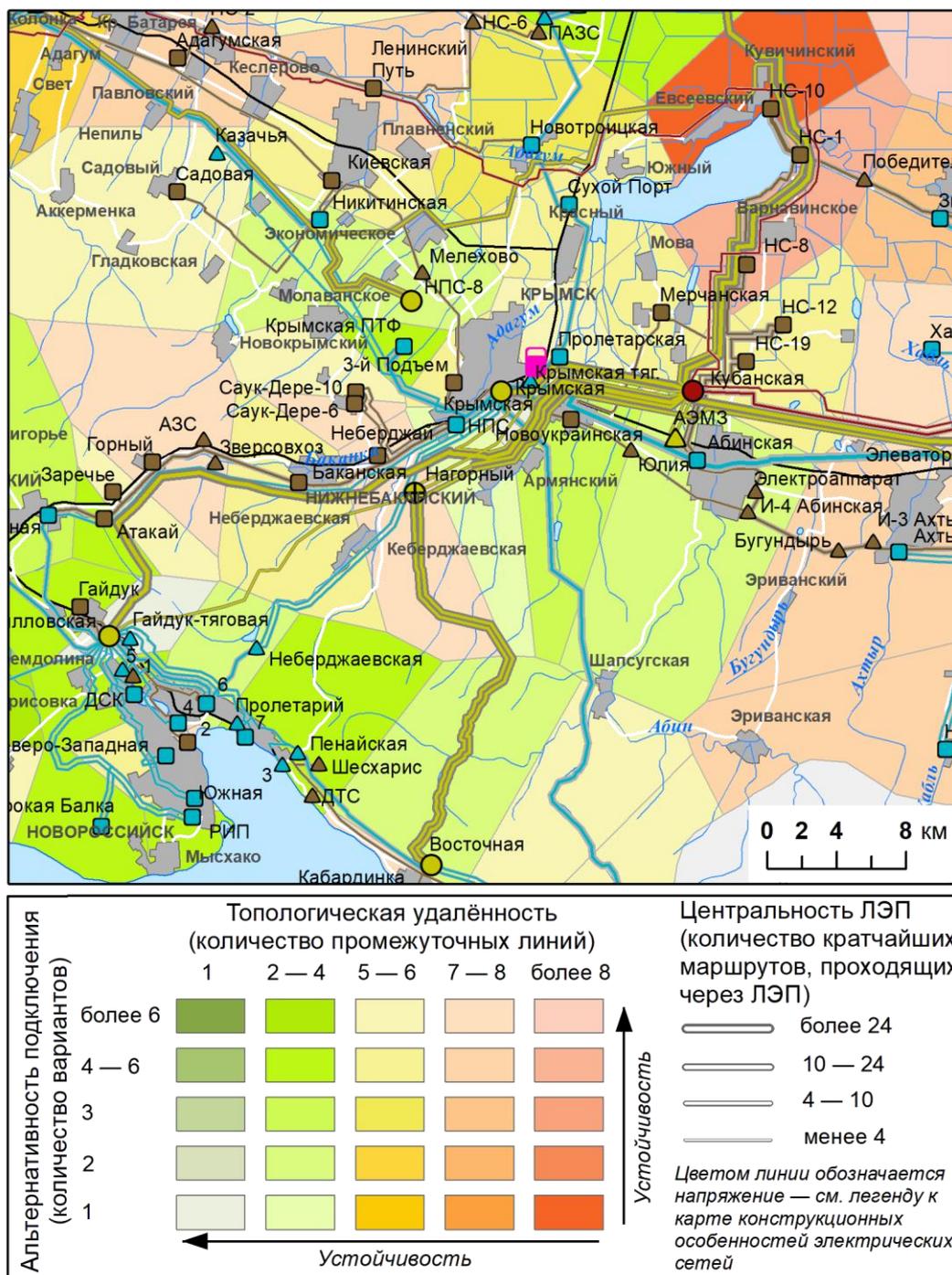


Рисунок 4 – Фрагмент карты структурной устойчивости энергоснабжения запада Краснодарского края

Данные карты составлены в масштабе 1:400 000, что необходимо для большей обзорности показателя при существующей детализации зон обслуживания. При отображении структуры используется слой электрических сетей в топологическом представлении, дополнительно генерализованный по сравнению с картой электрических сетей. Эта карта позволяет выявить потенциально наиболее загруженные ЛЭП и подстанции, которые уязвимы к аварийным ситуациям природного характера.

На основе описанного в работе алгоритма расчёта климатических нагрузок были получены модели климатического зонирования по ветровым и гололёдным нагрузкам. Наложение электрических сетей на модели климатического зонирования позволяет получить показатель климатического осложнения и соответствующие карты *климатического осложнения*. Данный безразмерный показатель для ВЛ рассчитывается как отношение взвешенной длины участков в каждой климатической зоне к климатической зоне с наименьшими нагрузками.

При составлении карт *перспективного развития электрических сетей* были использованы карты структурной устойчивости и климатического осложнения. Перспективные маршруты новых ЛЭП выбираются так, чтобы связать наиболее уязвимые подстанции с наиболее надёжными питающими центрами, повысить альтернативность энергоснабжения и уменьшить топологическую удалённость от питающего центра. Так осуществляется планирование развития сети. Дальнейшие карты серии направлены на обоснование трасс конкретных ЛЭП.

Карты *хозяйственных и санитарных ограничений для строительства ЛЭП* были составлены в масштабе 1:200 000, что обусловлено сочетанием необходимой детализации и обзорности. Сами объекты, исключая строительство в их пределах, показываются качественным фоном. Охранные и прочие буферные зоны, предусмотренные нормативно-правовой документацией, показываются штриховкой ярких тёплых цветов, которые позволяют идентифицировать тип объекта и его положение на местности. Помимо площадных ограничений на карте показаны осложняющие строительство линейные объекты, в том числе автомобильные и железные дороги, трубопроводный транспорт и ЛЭП в топографическом представлении (рисунок 5).

При составлении карт *потенциальной активизации опасных экзогенных процессов и нарушенности природно-территориальных комплексов* масштаба 1:200 000 используются ландшафтные карты. В качестве единиц картографирования используются ПТК для равнинных территорий и водосборные бассейны – для горных.

Для изучаемых ключевых участков были выбраны проектируемые магистральные ЛЭП, обозначенные в схемах территориального планирования и имеющие предварительный вариант трассы на портале САЦ Минэнерго. Для первого участка такой ЛЭП была выбрана ВЛ 750 кВ Ленинградская АЭС-2 – Ленинградская, для второго участка – ВЛ 220 кВ Кубанская – Бужора.

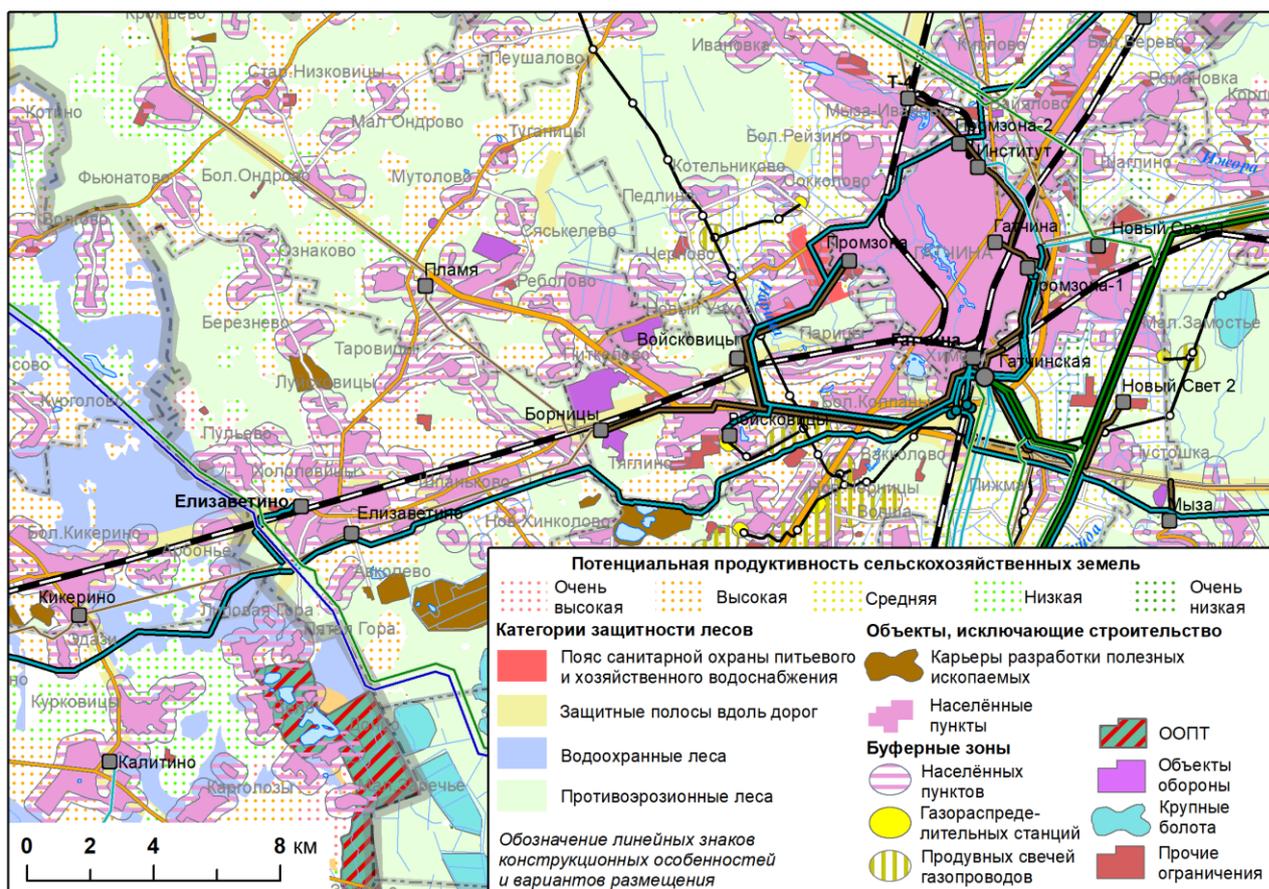


Рисунок 5 – Фрагмент карты хозяйственных и санитарных ограничений для строительства воздушной ЛЭП на западе Ленинградской области

При учёте линейных ограничений хорошо себя показывал принцип трёх буферных зон, который одновременно может выступать и в качестве ограничивающего фактора, и в качестве благоприятного фактора для размещения новой ВЛ параллельно существующей.

Для итоговой оценки территории с точки зрения возможности размещения ЛЭП были использованы балльные оценки. Все используемые критерии оценки были разделены с точки зрения разных заинтересованных сторон. Нами было выделено четыре такие стороны: *инженерная*, *землепользовательская*, *природоохранная* и *компромиссная*. Инженерная заинтересована в удобстве и надёжности эксплуатации проектируемой ЛЭП, а также наименьшей длине. Землепользовательская – в минимальном количестве задействованных землепользователей. Природоохранная – в минимизации потенциального воздействия на окружающую среду. Последняя представляет собой компромиссный вариант между тремя выше перечисленными. В соответствии с критериями каждой стороны были оценены все факторы и получено четыре поверхности стоимости, по которым был осуществлён автоматизированный выбор трассы ЛЭП. Карты *вариантов размещения трасс ЛЭП* визуализируют полученные варианты (рисунок 6).

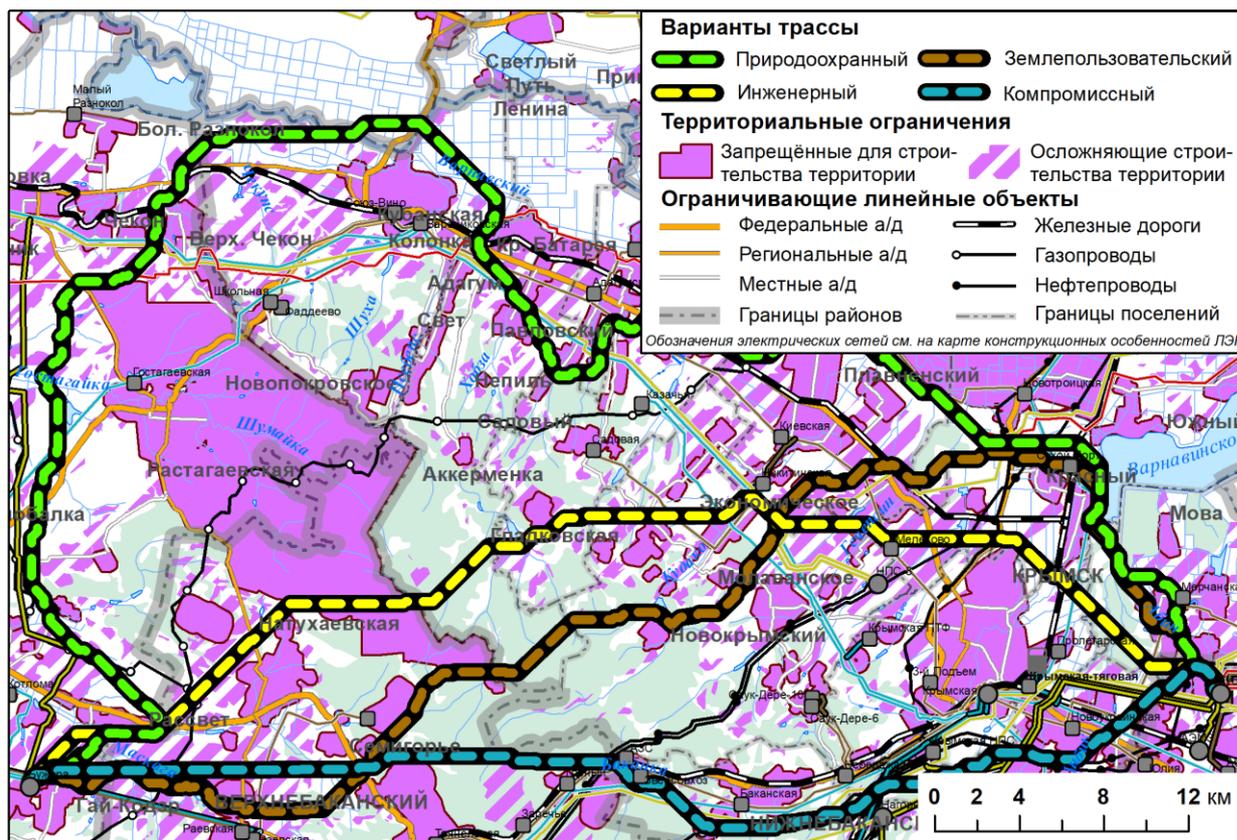


Рисунок 6 – Фрагмент карты вариантов размещения трассы воздушной ЛЭП 220 кВ Кубанская – Бужора в масштабе 1:300 000. Оригинал карты в масштабе 1:200 000

Заключение

На основании анализа пространственных особенностей размещения, функционирования и развития электрических сетей, а также опыта их картографирования выявлены ключевые особенности и аспекты их представления в базе пространственных данных и на картах различного масштаба и тематики. Сформулированы и реализованы два подхода: топологический и топографический. В топологическом подходе объектом картографирования выступает цепь ЛЭП, он позволяет визуализировать связи между объектами электрической сети, а также проводить сетевой анализ. В топографическом подходе объектом картографирования является ЛЭП, которая может быть как одноцепной, так и двухцепной или многоцепной – в этом случае визуализируются конструктивные особенности сети, указываются участки разного видового состава опор ЛЭП.

Видовой состав опор ЛЭП – комплексная характеристика, помогающая распознавать ключевые особенности топологии сети, свойства отдельных участков ЛЭП. Эти свойства позволяют моделировать охранные зоны, полосы, благоприятные для параллельного следования двух ВЛ, а также степень

изношенности сети при сопоставлении видового состава опор с типовыми проектами опор, которые были актуальны в разные годы.

Особенности взаимодействия географической оболочки с линиями электропередач на этапе строительства, эксплуатации и реконструкции обуславливают необходимость учёта климатических условий (опасных скоростей ветра и гололёдных отложений), опасных природных явлений, санитарных и хозяйственных ограничений при проектировании новых линейных объектов. При проектировании трассы новых ЛЭП необходимо учитывать текущее состояние природной среды (её нарушенность), а также прогнозировать возможность развития неблагоприятных экзогенных процессов. Наилучшим образом все эти особенности визуализируются картографическими методами, а анализируются и синтезируются – геоинформационными.

Разработанная методика картографо-геоинформационного обоснования планирования развития электрических сетей характеризуется двухуровневой многовариантностью, т. е. различные варианты строительства новых ЛЭП рассматриваются на двух уровнях: структурном и территориальном. На первом уровне происходит обоснование маршрута ЛЭП (то есть связи между двумя пунктами) на основании структурного анализа существующей сети. На втором уровне происходит обоснование вариантов трассы ЛЭП, то есть реализации маршрута на местности с учётом всех особенностей и ограничений. В зависимости от избранной концепции балльной оценки применительно к территориальным и технологическим ограничениям могут быть получены варианты трасс для разных заинтересованных сторон.

Разработанная методика апробирована на двух ключевых участках в Ленинградской области и Краснодарском крае, характеризующихся разными природными условиями. Одновременно с этим обе территории имеют высокий уровень хозяйственного освоения, что обуславливает необходимость учёта большого количества хозяйственных ограничений и особенностей природной среды.

Методика картографического обеспечения планирования развития региональных электрических сетей рекомендуется для использования научными и проектными организациями, которые занимаются территориальным планированием в области энергетики, а также проектированием протяжённых воздушных ЛЭП в сложных природных и социально-экономических условиях.

Основные научные результаты опубликованы в изданиях из списка RSCI Web of Science:

- 1) Изучение пространственной конфигурации электросетей по космическим снимкам / П. Е. Каргашин, Б. А. Новаковский, А. И. Прасолова, **А. М. Карпачевский** // Геодезия и картография. – 2016. – № 3. – С. 50–55.
- 2) Новаковский Б. А., Каргашин П. Е., **Карпачевский А. М.** Геоинформационное моделирование климатических нагрузок на ЛЭП (на примере юга о. Сахалин) // Геодезия и картография. – 2016. – № 10. – С. 49–55.

- 3) Картографирование структуры изолированных энергосистем (на примере Камчатского края, Магаданской и Сахалинской областей) / Б. А. Новаковский, А. И. Прасолова, **А. М. Карпачевский**, О. Г. Филиппова // Геодезия и картография. – 2017. – № 5. – С. 56–63.
- 4) Новаковский Б. А., Каргашин П. Е., **Карпачевский А. М.** Геоинформационный анализ территории для автоматизированного выбора трассы ЛЭП // Геоинформатика/Geoinformatika. – 2017. – № 2. – С. 30–38.

В прочих изданиях:

- 1) Каргашин П. Е., **Карпачевский А. М.** Методика крупномасштабного картографирования для эколого-географической оценки территории при проектировании высоковольтных линий электропередач // Инженерная экология. – 2014. – № 6. – С. 32–42.
- 2) Зимин К. А., Москалев А. В., **Карпачевский А. М.** Применение опор ЛЭП нестандартной компоновки в Москве и Московской области // Энергия единой сети. – 2017. – № 3. – С. 76–85.
- 3) **Карпачевский А. М.**, Каргашин П. Е. Дешифрирование объектов сетевой инфраструктуры топливно-энергетического комплекса // 10-я межд. молодежная школа-конференция Меридиан: Современные подходы к изучению экологических проблем в физической и социально-экономической географии / Под ред. М. Е. Кладовщиковой, А. А. Медведева, И. Г. Шоркунова. – М.: 11-й Формат, 2017. – С. 171–177.
- 4) **Карпачевский А. М.**, Филиппова О. Г. Картографическая оценка вероятности каскадных аварий в изолированных энергосистемах востока России // ИнтерКарто/ИнтерГИС 22. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий в условиях глобальных изменений климата: материалы Междунар. науч. конф. – Т. 2. – М.: Издательский дом НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА, 2016. – С. 61–65.
- 5) **Карпачевский А. М.**, Филиппова О. Г. Возможности картографирования аварийности энергосистем на основе открытых данных // ИнтерКарто/ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. – Т. 24, ч. 1. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. – С. 202–211.
- 6) **Карпачевский А. М.** Картографическое обеспечение предварительного обоснования трассы линии электропередач // ИнтерКарто/ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. – Т. 24, ч. 2. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. – С. 334–340.
- 7) Концепция геоинформационно-картографического обеспечения для оценки состояния и функционирования транспортной системы России Лурье И. К., Аляутдинов А. Р., Балдина Е. А., Каргашин П. Е., **Карпачевский А. М.**, и др. // Материалы II Международной научно-практической конференции ГЕОДЕЗИЯ, КАРТОГРАФИЯ, ГЕОИНФОРМАТИКА И КАДАСТРЫ, 8-10 ноября 2017 года, Санкт-Петербург – 2017. – С. 280–286.

- 8) Новаковский Б. А., **Карпачевский А. М.**, Каргашин П. Е. Геоинформационное картографирование электрических сетей: подходы и методы // Картография в цифровую эпоху / Под ред. В. М. Котлякова, И. К. Лурье, А. А. Медведева, Т. Е. Самсонова. – Т. 144 Вопросы географии. – М.: Издательский дом Кодекс, 2017. – С. 264–279.
- 9) Филиппова О. Г., Каргашин П. Е., **Карпачевский А. М.** Картографическая оценка надежности изолированных энергосистем Дальнего Востока с использованием геоинформационных технологий // Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова / Под ред. М. В. Зимина, П. Е. Каргашина, М. В. Кусильман и др. – М.: КДУ, 2017. – С. 99–109.