

УДК 528.942

© Б.А. Новаковский, П.Е. Каргашин, А.М. Карпачевский

*Б.А. Новаковский, П.Е. Каргашин, А.М. Карпачевский*

# ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ТЕРРИТОРИИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА ТРАССЫ ЛЭП

## Введение

С развитием геоинформационных технологий задача поиска оптимального маршрута перестала быть сложной с точки зрения организации вычислений. На первый план вышла проблема формализации исходной информации и ее адекватного описания в базе пространственных данных. В общем случае поиск оптимального маршрута может быть привязан к сети (сетевое представление) или к поверхности (растровое представление). Как правило, работы, посвященные поиску оптимальных трасс, используют только одну модель данных. Сетевое представление позволяет учитывать существующие линейные коммуникации, но ограничено в возможностях трассировки за пределами сети. Растровое представление позволяет учитывать все возможные варианты трасс, но не может однозначно формализовать ограничения, связанные с линейными коммуникациями. В данной работе проанализированы возможности комбинирования растровых и векторных данных для получения наиболее достоверного результата. В результате рассчитана оптимальная трасса ЛЭП, сопоставимая по своему качеству с утвержденным вариантом трассы.

## История вопроса

Линии электропередач (ЛЭП), как правило, протяженные объекты, трассы которых требуют учета как природных особенностей территории, так и законодательства в области строительства, эксплуатации электросетей, природопользования и ряда социально-экономических факторов. Первые работы, предлагающие методы трассировки ЛЭП, относятся к кабельным сетям, прокладываемым по небольшим городским территориям [9, 14]. Трассировка таких линий в значительной степени привязана к сети городских улиц и переулков, а в целом подобные задачи скорее относятся к инженерным.

Впервые методика трассировки воздушных ЛЭП (ВЛ) в географическом контексте осуществлена с помощью растровой модели данных [15]. В качестве исходных данных в работе использован космический снимок среднего пространственного разрешения, по которому были выявлены особенности

использования земель, растительного покрова, размещения мест добычи полезных ископаемых, населенных пунктов. На основе этих данных несколько вариантов трассы прокладывалось вручную, затем они сравнивались по длине и весам, присвоенным в соответствии с особенностями и ограничениями территории.

Менее чем через 5 лет проектирование маршрута воздушной линии было предложено автоматизировать [10]. Если представить трассу проектируемой ЛЭП как направленную линию из пункта А в пункт В, то для расчета ее оптимального маршрута необходимо использовать стоимостную поверхность. Эта поверхность представляет собой набор растровых ячеек, значение которых характеризует сложность, стоимость перемещения по ней. Например, стоимость перемещения по обычному лесу будет ниже, чем по болоту. Значения ячеек могут быть выражены как в реальных или условных денежных единицах, так и в единицах времени или условных баллах. Такая поверхность также широко известна как растр стоимости [7]. Алгоритм Дейкстры [8] позволяет найти путь из А в В с наименьшей суммарной стоимостью, работая с данным растром как с планарным графом. Такая задача известна как расчет маршрута движения с минимальными издержками [1]. В другой работе [11] было предложено использование «экономического коридора» ЛЭП, то есть территории, прохождение трассы в пределах которой экономически целесообразно. Для расчета коридора используется сложение растров стоимости, посчитанных в двух направлениях: из А в В, и из В в А.

В более поздних работах количество факторов, учитываемых при оценке территории с точки зрения выбора трассы, увеличивалось. В том числе начали учитывать соседство с существующими электрическими, газовыми и прочими сетями, стала даваться оценка пересечениям с этими объектами [13].

В другой работе авторов [3] рассматривался экологический аспект строительства ЛЭП 110 кВ. Однако данный аспект не единственный, который может существенно повлиять на предварительную трассировку линейного объекта. В текущей работе

нами будет рассмотрен комплекс факторов, вносящих ограничения или удорожания в строительство ЛЭП. Одна из ключевых проблем использования растровой модели данных при автоматизированной трассировке ЛЭП обозначена выше и на данный момент не имеет четкого решения. Она связана с учетом существующей сетевой инфраструктуры, т.е. других линейных сооружений: электрических сетей, газопроводов, автомобильных и железных дорог. Для ее решения предлагается использовать дополнительные векторные построения.

### Территория апробации

В качестве территории апробации был выбран запад Ленинградской области. Объектом трассировки послужила внесенная в схему территориального планирования РФ ВЛ 750 кВ Ленинградская АЭС-2 (Копорская)–Ленинградская. Эта проектируемая линия предназначена для выдачи мощности строящейся Ленинградской АЭС-2 в объединенные энергосистемы Северо-Запада и Центра. Предварительная трасса линии отмечена на портале Ситуационно-аналитического центра (САЦ) Министерства энергетики РФ [2].

Предполагаемая трасса ЛЭП проходит через четыре административных района Ленинградской области: Тосненский, Гатчинский, Ломоносовский, Волосовский, а также Сосновоборский городской округ. Строительство воздушных ЛЭП на территории города Санкт-Петербург запрещено, поэтому она не рассматривается. На изучаемой территории встречаются крупные труднопроходимые болота, лесные массивы. Большая часть территории расположена на Ижорской возвышенности, которая соответствует выходу карбонатных пород. Как следствие, почвы Ижорской возвышенности характеризуются относительно высоким плодородием, и вся территория в значительной степени исторически была освоена сельским хозяйством. С уменьшением доли сельскохозяйственного производства в 90-е годы активизировалось малоэтажное и коттеджное строительство на бывших угодьях, стала развиваться транспортная инфраструктура. Таким образом, гораздо большую роль при выборе маршрута ЛЭП здесь играют ограничения социально-экономического характера.

Большое количество сельских населенных пунктов, дачных поселков и садовых товариществ в значительной степени усложняют проектирование ЛЭП ультравысокого напряжения. Близость территории к Санкт-Петербургу обуславливает насыщенность транспортными коммуникациями регионального и федерального значения. Здесь проходят пять железнодорожных направлений, две автодороги

федерального значения и две автодороги регионального значения, а также магистральный газопровод Кохтла-Ярве – Ленинград с газопроводами-отводами. К юго-западу от Гатчины располагается Ленинградское подземное хранилище газа, инфраструктура которого вносит значительные коррективы в трассу проектируемой линии.

Существующие электрические сети также характеризуются высокой плотностью. Они представлены классами напряжений 35, 110, 330, 750 кВ. В данной работе сети 6-10 кВ в расчет не берутся, так как их наличие незначительно усложняет строительство магистральной ЛЭП. Наибольшая плотность сети соответствует окрестностям крупных питающих центров – ПС (подстанция) «Ленинградская», ПС «Гатчинская», Ленинградская АЭС. Особо следует отметить, что при проектировании новой линии необходимо избежать пересечений с уже существующей ВЛ 750 кВ Ленинградская АЭС – Ленинградская, а также минимизировать количество пересечений с другими ЛЭП, особенно с теми, которые относятся к магистральным сетям.

Кроме того, на рассматриваемом участке присутствуют особо охраняемые природные территории (ООПТ) регионального значения, объекты Министерства обороны, объекты промышленного и сельскохозяйственного производства. Такое количество и разнообразие ограничивающих факторов при проектировании требуют их локализации и анализа. Данные для картографирования были получены из открытых источников: Публичной кадастровой карты [5], Портала САЦ Минэнерго, OpenStreetMap [12] и других веб-картографических сервисов.

### Методика трассирования

Для апробации разработанной методики автоматизированного поиска трассы воздушной линии (ВЛ) был написан скрипт на языке программирования Python, с использованием функций библиотеки ArcPy. Для визуализации и анализа полученных результатов был использован ГИС-пакет ArcGIS.

Оценка территории с точки зрения строительства ЛЭП 750 кВ выполнялась на основе разработанной балльной системы от 1 до 10 баллов. Данная балльная система отражает сложность, стоимость строительства ВЛ в относительных безразмерных единицах. Полный запрет на строительство обозначается числом 9999, что заведомо большее число, максимально возможное для записи в формате короткого целого. Балльная система позволяет перейти к единой шкале оценки, т.е. ввести единую единицу измерения для будущего растра стоимости. Линейные объекты не имеют масштаба по ширине, что вызывает неоднозначность при переводе их в растровую

модель данных, где любая ячейка имеет конечные размеры в двух измерениях. В работе, описывающей автоматизированную трассировку газопроводов, предлагается построить буферную зону для рек и коммуникаций изучаемой территории, тем самым переведя их в площадные объекты [6]. Схожий принцип использован и в нашей работе, но ширина полосы определяется не масштабом исследования, а реальными ограничениями, установленными в нормативно-правовых актах.

Для площадных объектов, полученных путем буферизации линейных, балльная оценка проходит нормирование, то есть она пересчитывается в соответствии с шириной полосы, выражаемой в заданном разрешении растровой модели стоимости. Это необходимо для того, чтобы избежать переоценки линейных объектов. Например, если пересечение с газопроводом оценивается в 10 баллов, то необходимо распределить эти 10 баллов равномерно по всей ширине буферной полосы. Таким образом, нормированные значения баллов для линейных объектов зависят от ширины буферной зоны и разрешения итогового раstra стоимости. Нормирование балльной оценки осуществляется по следующей зависимости:

$$E_n = E \times res/w, \quad (1)$$

где  $E_n$  – нормированная оценка в баллах,  $E$  – оценка данного линейного объекта в баллах,  $res$  – разрешение растровой модели,  $w$  – ширина буферной зоны вдоль линейного объекта. Для площадных объектов нормирование баллов не требуется, но мы для удобства обобщения включим в это понятие обычную балльную оценку.

Ниже изложены принципы построения буферных зон, учет которых необходим при предварительном проектировании маршрута ЛЭП. Разрешение растровой модели было установлено исходя из предварительного анализа пространственных данных и составило 10 м. Такое разрешение может показаться слишком высоким для этапа предварительных исследований, однако это обусловлено рядом «узких мест» изучаемой территории, которые должны быть выражены в масштабе составляемой карты.

При изучении особенностей электрических сетей было выяснено, что они могут иметь разное представление как на карте, так и в базе пространственных данных: топологическое и топографическое [4]. При расчете ограничений, связанных с существующими электрическими сетями, наиболее рациональным видится применение именно топографического представления ЛЭП. Тем самым, из отдельных цепей ЛЭП, расположенных на одних опорах, были получены ЛЭП как единый линейный объект с указанием количества входящих в нее цепей

(цепности). Кроме того, немаловажно учитывать видовой состав применяемых опор ЛЭП, поскольку это влияет на геометрию охранных зон. Таким образом, в результате был получен векторный слой, состоящий из отдельных участков ЛЭП, однородных по своему видовому составу и цепности.

Вдоль существующих ЛЭП строится три буферные зоны, которые обозначают разную степень благоприятности пересечения с проектируемой линией. Первая буферная зона вдоль существующих линий имеет минимальный радиус и ограничивает строительство ЛЭП в непосредственной близости от них. Попадание проектируемой трассы ЛЭП в пределы этой зоны обосновано только в случае вынужденного пересечения с существующей линией. Радиус буферной зоны зависит от видового состава опор, т.к. согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ – правила устройства электроустановок: по состоянию на 1 февраля 2008 г. М.: КНОРУС, 2013. Вып. 7. – 507 с.), при сближении двух ВЛ необходимо учитывать расстояние между их крайними проводами, а также высоту опор. В зависимости от типа сближения (это может быть пересечение или параллельное следование двух ВЛ) берется различный радиус буферной зоны относительно оси существующей ЛЭП – ее топографического представления. Пересечение двух ЛЭП увеличивает вероятность каскадной аварии (падение проводов на ниже проходящую линию после их обрыва), требует сложных технических решений и относительно дорогого исполнения. Радиус первой зоны вычисляется следующим образом:

$$r_1 = d/2 + m + f, \quad (2)$$

где  $r_1$  – радиус первой зоны,  $d$  – расстояние между крайними проводами существующей линии (определяется видовым составом),  $m$  – минимальное расстояние между крайними проводами для ВЛ 750 кВ,  $f$  – расстояние от оси проектируемой линии 750 кВ до крайнего провода (определяется видовым составом). Именно поэтому ей присваивается более высокий балл. Для существующей ВЛ 750 кВ пересечение было поставлено под запрет (9999 баллов). Второй буферной зоне, которой соответствует полоса параллельного следования двух ВЛ в стесненных условиях, присваивается меньшая балльная оценка. Радиус второй зоны определяется ПУЭ и может быть вычислен по формуле:

$$r_2 = d/2 + h + f, \quad (3)$$

где  $r_2$  – радиус второй зоны,  $d$  – расстояние между крайними проводами существующей линии (определяется видовым составом),  $h$  – максимальная высота опор для данного видового состава,  $f$  – расстояние от оси проектируемой линии 750 кВ до крайнего провода. Заметим, что балльная оценка рассматри-



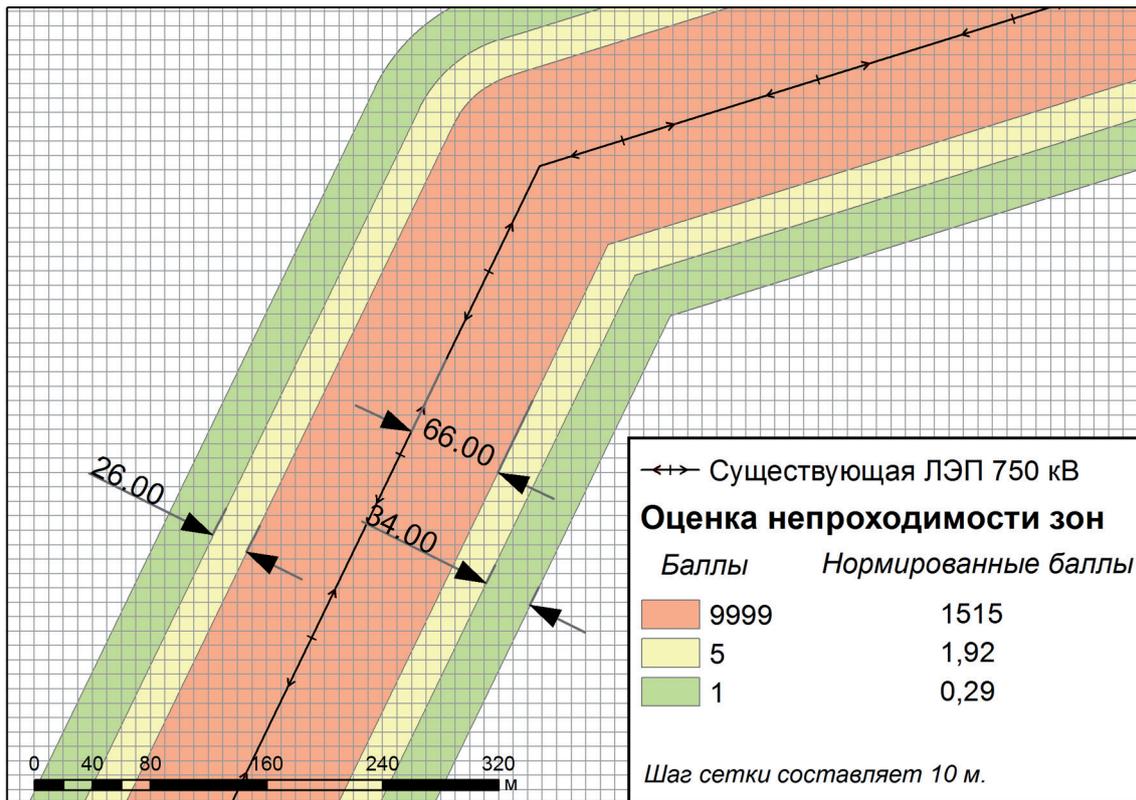


Рис. 1. Три зоны вдоль существующей ВЛ 750 кВ, позволяющие оценить возможности сближения с новой ЛЭП

цветом покрашены ячейки с оценкой для первой буферной зоны, то есть самой неблагоприятной для пересечения, голубым – ячейки со второй зоной (более благоприятной), зеленым – с третьей (наиболее благоприятные для проектирования ЛЭП).

Разработанный принцип трех буферных зон позволяет дать оценку пересечениям и сближениям проектируемой линии не только с существующими электрическими сетями, но и с газопроводами. Единственным отличием будет то, что для газопровода не нужно учитывать особенности видового состава, т.е. переменную  $d$ . В случае авто- и железных дорог буферных зон будет всего две (исключается третья зона с перекрытием охранных зон). Перечень экспертных оценок для остальных линейных объектов приведен в табл. 2.

Кроме выше перечисленных линейных объектов, были учтены муниципальные границы между районами и кадастровые границы, приуроченные к отдельным землевладельцам. Для этих объектов также были построены буферные зоны, радиус которых составляет половину итогового разрешения раstra, т.е. 5 м. Поскольку пересечения проектируемой ЛЭП границ административных районов и земельных участков усложняет процесс согласования, для полученных буферных зон также была присвоена балльная оценка.

Для некоторых других объектов построение буферных зон также необходимо. Например, для продувных свечей газопроводов, которые внесены в базу пространственных данных как точечные объекты, строились буферные зоны с радиусом 150 и 300 м согласно ПУЭ. В первой зоне строительство ЛЭП не разрешено, во второй – разрешается в стесненных условиях. Для газораспределительных станций (ГРС) построены зоны с радиусом 200 м, в пределах которых также невозможна трассировка ЛЭП.

Для населенных пунктов аналогичным образом построены буферные зоны с двумя радиусами – 250 м, запрещающие трассировку ЛЭП, и 300 м, разрешающие трассировку в стесненных условиях (СанПин № 2971-84 – «Защита населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты»). Помимо существующих деревень, дачных и коттеджных поселков, здесь были учтены еще не построенные, но уже нанесенные на кадастровую карту объекты. Для объектов гидрографии строятся охранные зоны в зависимости от типа объекта и его протяженности (водный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 31 октября 2016 года)).

Все оставшиеся объекты с указанием балльной оценки сведены в табл. 3.



Таблица 3

## Оценка неблагоприятности пересечения проектируемой ВЛ 750 кВ прочих объектов

Тип	Сложность		Балльная оценка неблагоприятности										
	Категория	Тип сближения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	9999
Газовое хозяйство	Свечи	Стесненные условия							■				
		Минимальное расстояние											■
	ГРС												■
Границы	Санкт-Петербург												■
	Муниципальные районы			■									
	Землевладельцы			■									
Гидрография	Реки	Длина 1-9 км		■									
		Длина 10-50 км			■								
		Длина более 50 км					■						
	Водоемы					■							
Селитьба	Города	Стесненные условия							■				
		Минимальное расстояние											■
	Сельские	Стесненные условия							■				
		Минимальное расстояние											■
	Дачные, садовые	Стесненные условия							■				
		Минимальное расстояние											■
ООПТ		Непроходимые										■	
Хозяйство	Промышленность												■
	Сельское	Фермы											■
		Угодья			■								
	Лесное	Угодья	■										
Кладбища												■	
Оборона												■	
Полезные ископаемые	Значимые												■
	Торф			■									
Болота	Труднопроходимые						■						

объектами у предлагаемого нами варианта трассы, проанализируем различия трасс по карте.

Можно выделить 4 основных участка, где различие трасс наиболее существенно. Эти участки ограничены на карте синей рамкой с номером участка в углу. Различие в трассировке на участке №1 в районе Ленинградской АЭС в значительной степени обусловлено наличием труднопроходимых болот. Разница маршрутов довольно существенна, но прохождение обоих вариантов характеризуется сопоставимой суммарной оценкой. Выбор трассы ЛЭП в районе этих болот может быть уточнен по

данным геологических изысканий. Между участком №1 и №2 маршрут трассы, полученной автоматизированным способом, в целом повторяет утвержденный вариант, в большей степени параллельно следуя ЛЭП 330 кВ ЛАЭС-2 – Пулковская.

На участке №2 различие автоматизированной трассировки и утвержденной трассы связано с обходом населенного пункта Черемыкино. Оба варианта представляются равнозначными. Практически вплотную к этому участку примыкает участок №3, связанный с обходом населенным пунктом Туганицы. Вариант, полученный автоматизированной

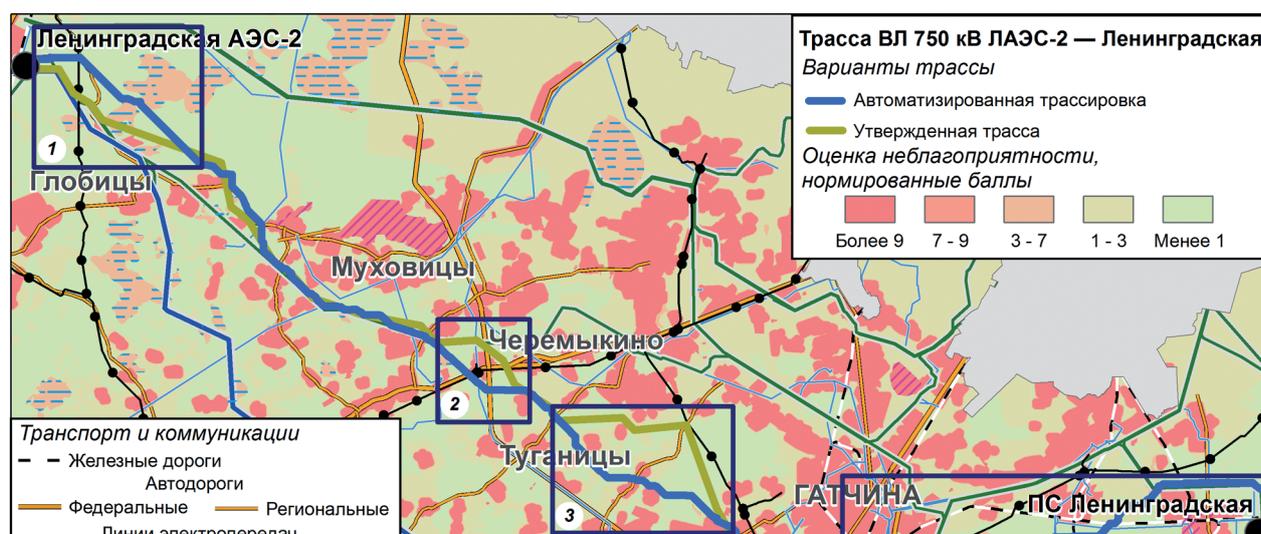


Рис. 2. Сравнение вариантов утверждённой трассы ЛЭП 750 кВ и полученного в результате автоматизированного трассирования

Таблица 4

Сравнение количества пересечений проектируемой ВЛ 750 кВ прочих объектов

Линейные объекты	Количество пересечений	
	Утверждённый вариант	Автоматизированная трассировка
<b>ЛЭП (всего)</b>	29	36
Двухцепные ВЛ 330 кВ	1	5
Одноцепные ВЛ 330 кВ	9	7
Двухцепные ВЛ 110 кВ	8	14
Одноцепные ВЛ 110 кВ	2	2
Двухцепные ВЛ 35 кВ	2	5
Одноцепные ВЛ 35 кВ	7	3
<b>Газопроводы (всего)</b>	5	7
Магистральные	3	5
Отводы	2	2
<b>Железные дороги (всего)</b>	5	7
Электрифицированные	3	6
Неэлектрифицированные	2	1
<b>Автодороги (всего)</b>	30	20
Федеральные	7	5
Региональные	10	9
Местные	13	6
<b>Границы муниципальных</b>	5	5
<b>Границы землевладений</b>	846	830

трассировкой действительно благоприятнее утвержденного варианта, поскольку позволяет существенно уменьшить длину линии

Участок № 4 выделяется самым большим расхождением вариантов трасс, что связано с наличием ООПТ регионального уровня – Лисинским заказником. Утвержденный вариант трассы следует параллельно существующей ВЛ 750 кВ, пересекая территорию заказчика. Поскольку мы обозначили его как непроходимый объект, алгоритм трассировки повел линию в обход на север. Данный обход сопровождается двумя нежелательными пересечениями с коридором из двух двухцепных ВЛ 330 кВ и двухцепной ВЛ 110 кВ. Кроме того, полученный вариант дважды пересекает один магистральный газопровод, что избегается в утвержденном варианте. Именно за счет такого серьезного ограничения у варианта трассы, полученного автоматизированным способом, набирается в целом больше пересечений с транспортными коммуникациями, чем у утвержденного варианта.

### Выводы

Разработанная методика автоматизированного трассирования ЛЭП хорошо себя показала на примере довольно сложной территории с большим количеством ограничивающих факторов преимущественно антропогенного характера. Учет особенностей существующей сетевой инфраструктуры позволил формализовать предпочтения по сближению проектируемой ЛЭП с другими ЛЭП, газопроводами, автодорогами и железными дорогами. В результате суммарная стоимость полученной трассы оказалась существенно ниже утвержденного варианта, что подтверждает эффективность методики. Кроме того, разработанный скрипт позволяет без труда вносить изменения в шкалу экспертных оценок, исходные данные, т. о. показывает себя как эффективный инструмент анализа.

Исследования выполнены в рамках госбюджетной темы «Методы и технологии картографии, геоинформатики и аэрокосмического зондирования в исследованиях изменений природной среды и общества» (Номер ЦИТИС: АААА-А16-116032810094-9).

**Ключевые слова:** автоматизированная трассировка, поверхность стоимости, пространственный анализ, путь наименьшей стоимости, электрические сети.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов. – М. : ГИС-ассоциация, 1999. – 204 с.

2. Геопортал САЦ Минэнерго [Электронный ресурс]. – URL: [http://xn--80alxdi0e.xn--80agflthakqd0d1e.xn--p1ai/sac\\_fire/](http://xn--80alxdi0e.xn--80agflthakqd0d1e.xn--p1ai/sac_fire/) (дата обращения 19.03.2017).

3. 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.

4. Каргашин П.Е., Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Карпачевский А.М. Изучение пространственной конфигурации электросетей по космическим снимкам // Геодезия и картография. – 2016. – № 3. – С. 53-58.

5. Публичная кадастровая карта [Электронный ресурс] // Росреестр : сайт. – URL: <http://pkk5.rosreestr.ru/> (дата обращения 19.03.2017).

6. Рыльский И.А. Влияние факторов географической среды на автоматизированное трассирование трубопроводов. – М. : МАКС Пресс, 2009. – 192 с. : ил. [16 с. вкл.].

7. Bolstad P. GIS fundamentals, a first text on geographic information systems. – St. Paul : Eider Press. – 620 p.

8. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // Numer. Math – Springer Science+Business Media. – 1959. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 269-271.

9. Lin W.M., Tsay M.T., Wu S.W. Application of geographic information system for substation and feeder planning // Electrical Power & Energy Systems. – 1996. – Vol. 18. – No. 3. – P. 175-183.

10. Luchmaya A., Dwolatzky B., Meyer A.S. Using terrain information in an electrification planning tool // Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transmission Distribution Conf. – 2001. – P. 456-460.

11. Monteiro C., Ramires-Rosado I.J., Miranda V., Zorzano-Santamaria P.J., Garcia-Garrido E., Fernandez-Jimenez L.A. GIS spatial analysis applied to electric line routing optimization // IEEE Transactions on Power Delivery. – April 2005. – Vol. 20. – No. 2. – P. 934-942.

12. OpenStreetMap [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения 19.03.2017).

13. Schmidt A.J. Implementing a GIS Methodology for Siting High Voltage Electric Transmission Lines // Papers in Resource Analysis. – 2009. – Vol. 11. – 17 p.

14. Summic Z., Venkata S.S., Pistorese T. Automated underground residential distribution design, part 1: conceptual design // IEEE Transactions on Power Delivery. – April 1993. – Vol. 8. – No. 2. – P. 637-643.

15. Vega M., Sarmiento H.G. Image processing application maps optimal transmission routes // IEEE Computer Applications in Power. – April 1996. – Vol. 9. – No. 2. – P. 47-51.