

Карпачевский А.М.¹, Филиппова О.Г.²

ВОЗМОЖНОСТИ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ АВАРИЙНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ

АННОТАЦИЯ

В данной статье авторы раскрывают смысл и взаимосвязь понятий надежности энергосистемы и ее подверженности аварийным ситуациям. Дано определение факторов надежности энергосистемы и их влияния на аварийность. Обоснована необходимость изучения и картографирования аварийности энергосистем в целях повышения надежности энергоснабжения. Отображена возможность использования открытых данных об аварийности в энергосистемах для анализа их работы. Подробно описаны структура данных, способ их интерпретации в табличный вид и пространственной привязки. Особое внимание уделяется выбору территориальной единицы картографирования: рассмотрены несколько ключевых подходов, применяемых в электроэнергетике. Среди них выбран наиболее подходящий для данного исследования.

С помощью агрегирования собранных данных проведено районирование энергосистем Российской Федерации по ведущей причине аварийных ситуаций. Предложен ряд репрезентативных расчетных показателей, характеризующих особенности аварийных происшествий в той или иной энергосистеме: количество аварий на один километр протяженности сети, количество аварий на единицу плотности сети, количество аварий в сетях разного типа, взвешенный аварийный коэффициент. Для каждого показателя обоснована причина его применения и показаны перспективы его дальнейшего использования.

На основе полученных данных и предлагаемых показателей создана серия из шести мелкомасштабных карт, иллюстрирующих особенности развития аварийных ситуаций в энергосистемах РФ. Анализ полученных результатов подтвердил репрезентативность предложенных показателей.

Основное назначение полученных карт прикладное, их использование помогает обнаружить «узкие» места в энергосистемах, определить ведущие причины аварий, соотношение различных причин аварий в конкретной энергосистеме.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрические сети, аварии, надежность энергосистемы, картографический метод исследования, открытые данные.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119234, Москва, Россия, *e-mail*: karpach-am@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119234, Москва, Россия, *e-mail*: missnothing96@yandex.ru

Andrey M. Karpachevskiy¹, Oksana G. Filippova²

OPPORTUNITIES OF POWER SYSTEMS' EMERGENCY MAPPING BASED ON OPEN DATA

ABSTRACT

In this article we describe the meaning of such terms as power system reliability and power system exposure to emergencies. We define reliability factors of power system and their impact on emergency. We proved the necessity of studying and mapping emergency due to the case of improving power system reliability. Then we showed opportunity of open data application concerning power systems' emergency. This information is useful for analysis of power systems' work. We carefully described the structure of this data and the approach of its interpretation from text to tables and their georeferencing. We paid particular attention to the choice of territorial unit for mapping: three main methods applied in electric power industry are analyzed. The one of them that is the most suitable for the research is chosen.

We marked zones of the main emergency cause in Russia by aggregating acquired data. Some new indexes we suggested to characterize special features of emergencies: a quantity of emergencies per 1 km of pipelines, a quantity of emergencies per 1 unit of pipelines density, a quantity of emergencies in different types of power grids and weighted coefficient of emergency. For every index we explain the reason for use and its' perspectives.

On the basis of acquired data we created the series of six maps illustrating the character of emergencies in Russian power systems. We analyzed results to confirm indexes representativity.

The main purpose of created maps is the use for power systems management such as recognizing weak spots in power systems, indication of main reasons of emergencies and to find out what's the ratio between the number of emergencies caoues by different reasons.

KEYWORDS: electrical power grids, emergencies, reliability of energosystems, map use, open data.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность энергосистемы является комплексным свойством и определяется как «способность выполнять функции по производству, передаче, распределению и снабжению потребителей электрической энергией в требуемом количестве и нормированного качества...» [Системный оператор Единой энергетической системы. Глоссарий [электронный ресурс] URL: <http://so-ups.ru/index.php?id=glossary#c993> Дата обращения 27.03.2018]. Возможность реализации энергосистемой этих функций зависит от ряда условий, которые в электроэнергетике традиционно оценивают с помощью различных расчетных величин, зависящих от технических параметров электроустановок (время бесперебойной работы, частота ремонтов и т. д.). Однако такой способ оценки не учитывает природные особенности территории и конфигурационные свойства сети, оказывающие значительное влияние на надежность энергосистемы [Филиппова и др., 2017]. Эти географические условия являются факторами надежности энергосистем. Анализ литературных и картографических источников показывает, что опыт их картографирования весьма невелик и сводится к созданию мелкомасштабных карт райони-

¹ Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, Leninskie gory, 1, 119234, Moscow, Russia, e-mail: karpach-am@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, Leninskie gory, 1, 119234, Moscow, Russia, e-mail: missnothing96@yandex.ru

рования территории России по ряду гидрометеорологических и геоморфологических характеристик [Правила устройства электроустановок, 2008].

Аварийность является свойством, характеризующим критический уровень влияния тех или иных факторов надежности на энергосистему. На основе данных об аварийности возможно решить ряд задач, связанных с изучением надежности: выявить ведущие факторы надежности для конкретной энергосистемы, определить наиболее уязвимые участки энергосистем. Удобнее всего эти задачи решаются с помощью картографического метода исследования, который ранее не применялся для исследования данного свойства энергосистем. В связи с этим целью данной работы является анализ возможностей применения данных об аварийности для картографирования надежности энергосистем. Для достижения данной цели необходимо решить ряд задач. Во-первых, необходимо собрать и синтезировать исходные данные об аварийности энергосистем России; во-вторых, на основе полученной информации предложить ряд показателей картографирования, отражающих влияние того или иного фактора на энергосистему.

Полученные на основе разработанных показателей картографические изображения могут стать удобным инструментом для географического анализа электросетевой инфраструктуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основным источником данных об аварийности стали материалы еженедельной статистической отчетности Министерства энергетики, размещенные на официальном Интернет-ресурсе [Министерство энергетики. Оперативная информация об аварийных отключениях на объектах ТЭК [сайт] URL: <https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/5022/67741>. Дата обращения 28.03.2018]. Файл с данными отчетности представляет собой набор оперативной информации об аварийных отключениях на объектах топливно-энергетического комплекса с разделением по отраслям промышленности: газовой, угольной и электроэнергетики. В соответствии с этим файл включает в себя несколько разделов. В разделе об аварийных ситуациях в электроэнергетике представлена следующая информация:

- регион, в котором произошла аварийная ситуация;
- объект, на котором произошла авария (электростанции, подстанции, линии электропередачи);
- дата и точное время аварии;
- причины аварии;
- работы по устранению аварии;
- последствия для потребителей.

Значительным неудобством данного источника информации являются представление данных в текстовом виде и различие в полноте представленных сведений о той или иной аварии. Так, не всегда приводятся названия конкретных объектов, подвергшихся аварии; не всегда уточняются причины аварии. Поэтому самый первый и важный этап работы – формализация и структуризация исходных данных, приведение их в удобный для пользователя вид.

Для целей данного исследования были обработаны данные в период с 1 января по 31 декабря 2016 г. С официального ресурса Министерства энергетики было загружено порядка 65 файлов с информацией об аварийных отключениях. Представленные данные были внесены в таблицу Microsoft Excel. Ниже приведен фрагмент этой таблицы (табл. 1):

Соответствующим образом представлена вся информация об аварийных отключениях на территории РФ за год. Всего их произошло порядка 1000. Необходимо отметить, что учитывались только аварии на линиях электропередачи, имеющие напряжение более

110 кВ. Выбор такого критерия отбора информации связан прежде всего с необходимостью выделения наиболее существенных факторов надежности для энергосистем регионального уровня; рассмотрение более низких классов напряжения затруднит выделение ведущих причин аварийности на той или иной территории.

Таблица 1. Фрагмент таблицы данных об авариях в энергосистемах
Table 1. Fragment of the table of data on emergencies in power systems

Субъект РФ	Объект	Причина аварии
Красноярский край	1. ВЛ 110 кВ «ЛЭП-182»	Обрыв провода
	2. КВЛ 110 кВ Ванкорская ГТЭС-Мангазея	Обрыв гирлянды изоляторов на опоре 184
	3. ВЛ 110 кВ Надежда-ГПП103	Гололедно-изморозевые отложения
	4. ВЛ 110 кВ Районная-ГПП103	Гололедно-изморозевые отложения
	5. ВЛ 110 кВ Надежда-ГПП 49,51,59	Сильный ветер
	6. ВЛ 110 кВ Районная-ГПП 49,51,59	Техническая

Необходимо также формализовать и унифицировать причины аварийных ситуаций. Эта задача усложняется отсутствием какого-либо единого шаблона представления отчетности по аварийным ситуациям, вследствие чего причины аварий зачастую описаны с разной степенью подробности. Поэтому после создания итоговой таблицы все причины аварий были разбиты на следующие группы:

- технические (не зависящие от природных условий среды);
- вследствие атмосферных процессов (ветровые и гололедные нагрузки, грозы, налипание снега на провода);
- вследствие геоморфологических процессов (сход оползней и селей);
- вследствие гидрологических процессов (подтопления).

Ниже приведена табл. 2, иллюстрирующая общее количество аварий и их основные причины в регионах РФ.

Анализ полученной таблицы показывает, что более чем для 60 % представленных регионов основной причиной аварий являются технические происшествия, для 30 % – атмосферные процессы; около 10 % приходится на геоморфологические и гидрологические процессы. Суммарно для 40 % регионов преобладающая часть аварий связана с природными процессами. Необходимо отметить, что наибольшей аварийностью характеризуются как раз те регионы, в которых аварии происходят по причине воздействия природных явлений и процессов. К таким относятся Ханты-Мансийский автономный округ, Ямало-Ненецкий автономный округ, Алтайский край и т. д. Наименьшее количество аварий характерно для регионов Центральной России, Поволжья, Черноземья.

Следующий шаг – выбор территориальной единицы картографирования. В картографии существует ряд традиционно используемых территориальных единиц картографирования: ландшафтные, бассейновые, административно-территориальные. Однако в данном случае ни одна из этих территориальных единиц не соответствует особенностям предполагаемого для картографирования объекта – энергосистемам. Энергосистемы не приурочены к природным границам; зачастую они не совпадают с сеткой административно-территориального деления, так как обслуживают комплекс взаимосвязанных потребителей электроэнергии, разнесенных друг от друга на большие расстояния. В связи с этим целесообразно рассмотреть подходы к территориальному делению, используемые в электроэнергетике.

Таблица 2. Фрагмент таблицы «Количество и причины аварий
в энергосистемах регионов РФ»
Table 2. Fragment of the table "Number and causes of emergencies
in the power systems of the Russian regions"

Регион	Суммарное количество аварий	Преобладающая причина
Республика Адыгея (Адыгея)	4	Атмосферные процессы
Республика Башкортостан	8	Техническая
Республика Бурятия	26	Техническая
Республика Алтай	9	Техническая
Республика Дагестан	34	Атмосферные явления
Республика Ингушетия	3	Гидрологические процессы
Кабардино-Балкарская Республика	1	Гидрологические процессы
Республика Калмыкия	3	Атмосферные процессы
Карачаево-Черкесская Республика	6	Атмосферные процессы
Республика Карелия	14	Техническая
Республика Коми	7	Техническая
Республика Мордовия	3	Техническая
Республика Саха (Якутия)	25	Атмосферные процессы
Республика Северная Осетия (Алания)	5	Техническая
Республика Татарстан (Татарстан)	8	Техническая
Республика Тыва	8	Техническая
Удмуртская Республика	3	Техническая
Республика Хакасия	33	Техническая
Чеченская Республика	2	Атмосферные процессы
Чувашская Республика (Чувашия)	15	Техническая
Алтайский край	49	Атмосферные процессы
Краснодарский край	27	Атмосферные процессы
Красноярский край	19	Атмосферные процессы
Приморский край	20	Атмосферные процессы
Ставропольский край	12	Техническая
Хабаровский край	22	Техническая
Амурская область	5	Атмосферные процессы
Архангельская область	7	Техническая
Астраханская область	1	Техническая
Белгородская область	1	Техническая
Брянская область	1	Техническая
Владимирская область	2	Техническая
Волгоградская область	14	Техническая
Вологодская область	4	Техническая
Иркутская область	27	Атмосферные процессы
Калужская область	6	Техническая

Первый подход к территориальному делению разработан ПАО «ФСК ЕЭС» [Федеральная Сетевая Компания. Структура компании [сайт] URL: <http://www.fsk-ees.ru/about/structure/> Дата обращения 28.03.2018]. Он включает в себя разделение энергосистем России на восемь магистральных электрических сетей (МЭС): Центра, Волги, Востока, Северо-Запада, Урала, Сибири, Западной Сибири, Юга. Каждая МЭС, в свою очередь, включает в себя от 4 до 8

предприятий магистральных электрических сетей (ПМЭС) (рис. 1). Отдельно выделяются изолированные энергосистемы. Изолированность энергосистем может быть как вследствие институциональных причин (Башкортостан, Иркутская область), так и вследствие сложных природных условий (Якутия, Сахалинская область, Чукотский автономный округ).



Рис. 1. Территориальное деление ПАО «ФСК ЕЭС» [Федеральная Сетевая Компания. Структура компании [сайт] URL: <http://www.fsk-ees.ru/about/structure/> Дата обращения 28.03.2018] Fig. 1. Territorial units of PJSC "FSK EES" [Federalnaya Setevaya Kompaniya. Struktura kompanii [website] URL: <http://www.fsk-ees.ru/about/structure/> Date of application 28.03.2018]

Второй подход к территориальному делению разработан ПАО «Россети» [Россети. Дочерние электросетевые компании [сайт] URL: <http://www.rosseti.ru/about/sites/> Дата обращения 28.03.2018]. В его основе лежит разделение обслуживаемых территорий на межрегиональные распределительные компании (МРСК). МРСК, как правило, обслуживает несколько соседствующих друг с другом регионов. МРСК делится на региональные распределительные сети, которые соответствуют тому или иному региону страны (рис. 2).



Рис. 2. Территориальное деление ПАО «Россети» [Россети. Дочерние электросетевые компании [сайт] URL: <http://www.rosseti.ru/about/sites/> Дата обращения 28.03.2018]

Fig. 2. Territorial units of PJSC "Rosseti" [Rosseti. Subsidiary companies [website] URL: <http://www.rosseti.ru/about/sites/> Date of application 28.03.2018]

В основе обоих подходов лежит разделение обслуживаемых территорий именно по административно-территориальной принадлежности, что является большим минусом и противоречит идее энергосистемы как совокупности объектов электросетевого хозяйства, взаимосвязанных между собой и обеспечивающих комплексное снабжение потребителя.

Третий и наиболее удачный вариант территориального деления предложен Системным оператором Единой энергетической системы (СОЕЭС) (рис. 3) [Системный оператор Единой энергетической системы. Филиальная структура компании [сайт] URL: <http://so-ups.ru/index.php?id=structure> Дата обращения 28.03.2018]. 70 региональных энергосистем образуют 7 объединенных энергосистем: Центра, Средней Волги, Юга, Северо-Запада, Урала, Сибири, Востока. Объединенные энергосистемы обслуживаются объединенными диспетчерскими управлениями (ОДУ); также существуют 49 региональных диспетчерских управлений (РДУ), управляющих энергосистемами одного или нескольких субъектов РФ.

Данное территориальное деление является наиболее логичным из всех представленных. Во-первых, в его основе заложена не административно-территориальная принадлежность, а реальное пространственное расположение объектов электросетевого хозяйства и взаимосвязи между ними [Системный оператор Единой энергетической системы: соотно-

шение территорий федеральных округов, регионов и энергосистем [сайт] URL: <http://so-ups.ru/index.php?id=fops> Дата обращения 29.03.2018]: например, в ОЭС Востока входит не вся Якутия, а лишь та часть, которая технологически присоединена к энергосистеме Амурской области и Хабаровского края. Во-вторых, это деление не учитывает наличия в отдельных регионах собственных энергетических компаний. Так, в делении ФСК ЕЭС и Россетей представлены субъекты, которые не обслуживаются ими по причине наличия собственной энергосетевой компании, что, однако, не исключает взаимодействия между элементами энергосистем. В связи с этим данный подход к территориальному делению и выбору единицы картографирования – зон обслуживания РДУ – является наиболее оптимальным. Приведенные в табличный вид данные были привязаны к зонам обслуживания РДУ.

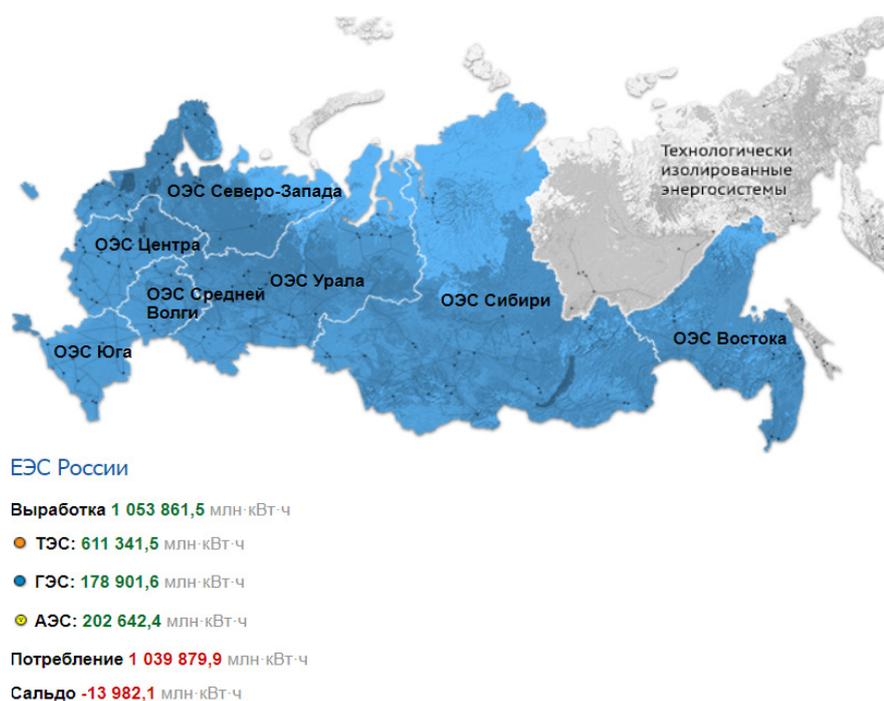


Рис. 3. Территориальное деление СОЕЭС [Системный оператор Единой энергетической системы. Филиальная структура компании [сайт]

URL: <http://so-ups.ru/index.php?id=structure> Дата обращения 28.03.2018]

Fig. 3. Territorial units of SOUPS [System operator of United power system. Branches [website] URL: <http://so-ups.ru/index.php?id=structure> Date of application 28.03.2018]

Следующим этапом работы является разработка показателей, репрезентативных с точки зрения анализа работы энергосистемы. Картографирование различных показателей работы энергосистемы находится на стыке двух направлений тематического картографирования: экологического и транспортного. Существующие работы по картографированию аварийности техногенных систем достаточно редко предусматривают возможность применения предлагаемых способов картографирования к энергосистемам и чаще посвящены последствиям аварий (в частности, экологическим), а не их причинам [Щербаков, 2010]. Традиционно применяемые в географии транспорта показатели (индексы Канского) [Чибряков, 2015] и стандартные расчетные показатели, основанные только на понятиях теории графов [Сёмина, Фоломейкина, 2009], не учитывают специфику электросетевой инфраструктуры. Приведенные ниже показатели могут быть рассчитаны на основе полученных на этапе сбора данных и открытой информации об энергосистемах.

На основе первоначальных данных необходимо прежде всего провести классификацию зон обслуживания РДУ по главной причине аварийных ситуаций. Такое районирование поможет выделить наиболее важные аспекты аварийности региона и сосредоточиться на анализе той или иной причины.

Изначально извлеченный из исходных данных показатель общего количества аварий недостаточно полно иллюстрирует подверженность энергосистемы авариям. Это связано с различной протяженностью и нагруженностью различных энергосистем. Предлагается использовать следующие характеристики:

– Количество аварий на один километр сети конкретного номинального напряжения. Данный показатель иллюстрирует подверженность того или иного класса напряжений авариям с учетом протяженности сети. Так как протяженность сети иллюстрирует уровень ее развития, полученная характеристика позволяет судить об общей устойчивости энергосистемы к авариям.

– Количество аварий на плотность сети конкретного номинального напряжения. Аналогичный предыдущему показатель, иллюстрирующий аварийную нагрузку на разные по плотности сети. В более плотных сетях количество аварий должно быть меньше, чем в менее плотных, за счет наличия других источников электроэнергии.

– Количество аварий в энергосетях разного типа. В классической географии транспорта выделяются циклические и дендритные типы сетей [Тархов, 2005]. Данный подход может успешно применяться и для анализа устойчивости электросетей; предлагаемая численная характеристика позволяет четко продемонстрировать связь между количеством аварий и типом сети.

– Взвешенный аварийный коэффициент. Данный коэффициент представляет собой сумму произведений количества аварий в конкретном классе напряжения, помноженных на вес, выбранный для данного класса напряжения. Чем больше напряжение линии, тем большее количество энергии она переносит и, соответственно, тем большую роль играет в надежности энергоснабжения. Поэтому логично, что для напряжения 110 кВ вес будет наименьшим (например 1), а для напряжения 750 кВ – наибольшим (например 5). Допустимые значения весов не ограничены какими-либо конкретными числовыми значениями, однако важно, чтобы они соответствовали иерархии той или иной энергосистемы. Смысл данной характеристики заключается в том, что она дает возможность качественно сравнить аварийность в разных энергосистемах.

Таким образом, открытые данные о количестве аварий в энергосистемах могут послужить источником информации для анализа их работы. Систематизируя и анализируя эту информацию, возможно выявить главенствующие причины аварий в каждой энергосистеме. Однако полученные данные требуют интерпретации с учетом пространственных характеристик энергосистем для осуществления корректной работы с ними и объективного сравнения качественных и количественных характеристик работы энергосистем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе полученных данных была составлена серия карт, иллюстрирующих аварийность энергосистем Российской Федерации. Масштаб карт 1 : 15 000 000, проекция Национального атласа России. Первая карта «Энергосистемы России» является инвентаризационной и показывает границы энергосистем (зон обслуживания РДУ). Вторая карта «Причины аварий в энергосистемах» иллюстрирует районирование, проведенное на основе собранных данных. Последующие четыре карты иллюстрируют вышеприведенные показатели, которые охарактеризовали с нескольких аспектов пространственную дифференциацию аварийности энергосистем России.

ВЫВОДЫ

Энергосистемы России в разной степени подвержены аварийным ситуациям по различным причинам. Более трети аварий случается по причине природных условий функционирования энергосистем. К этому их предрасполагают не только технические особенности сети, но и ее конфигурационные свойства. Использование открытых данных отчетности об аварийных ситуациях стало основой для разработки ряда показателей, нацеленных на многоуровневый анализ аварийности энергосистем. Расчет этих показателей позволяет создать картографические материалы. Они, в свою очередь, могут служить основой для выявления наиболее подверженных авариям компонентов энергосистем. Необходимо отметить, что разработка показателей работы энергосистем и создание карт на их основе проводятся впервые.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сёмина И.А., Фоломейкина Л.Н. Пространственный анализ в региональном исследовании транспорта с использованием ГИС-технологий // Географический вестник. 2009. № 2. С. 58–67.
2. Тархов С.А. Эволюционная морфология транспортных сетей. Смоленск: Изд-во «Универсум», 2005. 384 с.
3. 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. Зиминой, П.Е. Каргашина, М.В. Кусильмана и др. КДУ, М., 2017. С. 99–109.
4. Чибряков Я.Ю. Развитие картографического метода для исследования железнодорожных сетей России: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. тех. наук. М., 2015. 27 с.
5. Щербakov Ю.С. Геоинформационное картографирование интегрированных природно-технологических рисков // Интерэкспо ГеоСибирь. 2010. № 2. С. 51–55.

REFERENCES

1. Chibryakov Y.Yu. Development of the cartographic method for the study of rail networks in Russia. The dissertation author's abstract on competition of a scientific degree of the candidate of engineering sciences. Moscow, 2015. 27 p. (in Russian).
2. Filippova O.G., Kargashin P.E., Karpachevsky A.M. Mapping of reliability of isolated power systems of the Far East using GIS-technologies. Scientific research of young scientists-cartographers, performed under the guidance of the staff of the Department of Cartography and Geoinformatics of the Faculty of Geography of Moscow State University of M.V. Lomonosov. Ed. M.V. Zimin, P.E. Kargashin, M.V. Kusilman and others. KDU, Moscow, 2017. P. 99–109 (in Russian).
3. Semina I.A., Folomeykina L.N. Spatial analysis in the regional study of transport using GIS-technologies. Geographical Bulletin. 2009. No 2. P. 58–67 (in Russian).
4. Shcherbakov Yu.S. Geoinformation mapping of integrated natural and technological risks. Interexpo Geosibir. 2010. No 2. P. 51–55 (in Russian).
5. Tarkhov S.A. Evolutionary morphology of transport networks. Smolensk. M.: Publishing House "Universum", 2005. 384 p. (in Russian).