

В.И. БЛАНУЦА

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, blanutsa@list.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В РОССИИ: ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ПОДХОД

В мировой науке отсутствуют подходы к определению критической телекоммуникационной инфраструктуры, опирающиеся на концепции общественной географии. Представлены разработка такого подхода и его апробация на примере единой оптоволоконной сети Российской Федерации. Теоретическую основу подхода составила концепция экономико-географического положения и ее расширение в виде инфокоммуникационно-географического положения. Это позволило оценить положение любого критического элемента через параметры сети, сформированной этим элементом. В данном контексте критической телекоммуникационной инфраструктурой являются узлы и линии связи, случайное или преднамеренное отключение которых приводит к последующему отключению других узлов и линий. Предложено различать обычные, критические, критически-зависимые и зависимые узлы, а также обычные и критические линии. Методической основой подхода стал авторский алгоритм выявления критических узлов. Исходная информация взята из авторской базы данных об отечественных линиях электросвязи и данных Росстата о численности населения российских городов на 1 января 2022 г. Рассмотрены 1111 из 1117 городов, так как шесть из них не были подключены к единой оптоволоконной сети России. Реализация географического подхода позволила обнаружить более ста критических узлов (городов). Приведена характеристика десяти наиболее критически важных узлов. Выполнено распределение количества и плотности городов по четырем типам узлов и федеральным округам России. Установлено, что большинство критических линий расположено до небольших городов. Обсуждение полученных результатов проведено с позиции исследовательских ограничений, имитации одновременного отключения нескольких критических элементов и рекомендаций по прокладке новых линий связи. Практическая значимость полученных результатов может быть связана с разработкой телекоммуникационных мероприятий по повышению устойчивости оптоволоконной сети. Предложено три направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: общественная география, инфокоммуникационно-географическое положение, оптоволоконная сеть, город, критический узел связи, критическая линия связи.

V.I. BLANUTSA

V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, blanutsa@list.ru

IDENTIFICATION OF CRITICAL TELECOMMUNICATIONS INFRASTRUCTURE IN RUSSIA: A GEOGRAPHICAL APPROACH

In world science there are no approaches to identifying critical telecommunications infrastructure based on the concepts of human geography. The aim of our study was to develop such an approach and to test it using the example of a single fiber-optic network of the Russian Federation. The theoretical basis of the approach was the concept of economic and geographical location and its expansion in the form of info-communication and geographical location. This made it possible to estimate the position of any critical element through the parameters of the network formed by this element. In this context, critical telecommunications infrastructure includes nodes and communication lines, the accidental or intentional disconnection of which leads to the subsequent disconnection of other nodes and lines. It is proposed to distinguish between ordinary, critical, critically dependent and dependent nodes, as well as ordinary and critical lines. The methodical basis of the approach was the author's algorithm for identifying critical nodes. The initial information was taken from the author's database on domestic telecommunication lines and Rosstat data on the population of Russian cities as of January 1, 2022. One thousand one hundred and eleven out of 1117 cities were considered, since six cities were not connected to the single fiber-optic network of Russia. The implementation of the geographical approach made it possible to detect more than a hundred critical nodes (cities). The characteristics of the ten most critical nodes are given. The distribution of the number and population of cities across four types of nodes and federal districts of Russia

has been carried out. It has been established that most of the critical lines are laid to small towns. The results obtained were discussed from the standpoint of research limitations, simulation of simultaneous disconnection of several critical elements and recommendations for laying new telecommunication lines. The practical significance of the results obtained may be related to the development of telecommunication measures to improve the stability of the fiber-optic network. Three directions of further research are proposed.

Keywords: *human geography, info-communication-geographical location, fiber-optic network, city, critical telecommunication node, critical telecommunication line.*

ВВЕДЕНИЕ

В XXI в. наблюдается рост количества научных исследований, посвященных критической инфраструктуре (согласно www.scopus.com на 25.12.2022, ключевое словосочетание critical infrastructure в 1962–2000 гг. встречалось в 1215 публикациях, в 2001–2010 гг. — в 8537, а в 2011–2022 гг. — в 36 516). При этом использовались разные определения такой инфраструктуры [1–4]. В наиболее общих чертах под критической инфраструктурой понимаются техногенные объекты, частичное или полное прекращение работы которых может оказать существенное влияние на функционирование общества. Сбой в одном виде критической инфраструктуры может привести к сбоям в других видах («каскадный эффект») [5, 6]. Одним из видов со значительными каскадными последствиями является телекоммуникационная инфраструктура (например, в Европейском союзе в 2004–2018 гг. среди всех видов критической инфраструктуры наибольшее количество каскадного инициирования сбоев приходилось на телекоммуникации [7]).

Различия в понимании критической инфраструктуры имеют место не только в научном сообществе, но и в официальных документах разных государств и их объединений [3]. В России основным документом является Федеральный закон № 187-ФЗ, принятый в июле 2017 г. [8]. Во второй статье этого закона к объектам критической информационной инфраструктуры отнесены в том числе информационно-телекоммуникационные сети. Однако трактовка критической инфраструктуры через перечисление объектов с научной точки зрения не совсем корректна, так как более важны критерии отнесения любого объекта к критической категории. Дополнительную путаницу вносит выделение «значимых объектов» и некоторые другие неопределенности [9]. Общая направленность закона связана с обеспечением кибербезопасности критических объектов.

Одной из критически важных инфраструктур в нашей стране является единая сеть электросвязи Российской Федерации [10]. Основные отечественные линии связи показаны на картосхемах магистральных сетей [11] и межрегиональных оптоволоконных линий [12]. Оценка критичности узлов и линий связи обычно проводится в рамках технического подхода, но также могут использоваться экономический и некоторые другие подходы [13]. До настоящего времени среди них не было собственно географического подхода, хотя географы изучали элементы критической телекоммуникационной инфраструктуры с помощью других — не географических — инструментов [14, 15]. Поэтому целью нашего исследования стала разработка географического подхода к идентификации критической телекоммуникационной инфраструктуры и его апробация на примере российской оптоволоконной сети.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА

Перечень всех возможных подходов к определению критической телекоммуникационной инфраструктуры до сих пор никем не установлен. Несмотря на это, предпринимаются попытки сформировать комплексный подход на основе учета уровней структурной устойчивости и избыточности инфраструктуры, скорости ее восстановления и взаимосвязей с другими видами инфраструктуры [16]. Однако в подобных работах пространственно-временные (географические) процессы либо вообще не учитываются, либо служат некоторым второстепенным фоном в технико-экономических обоснованиях выделения критических элементов (объектов). При этом развертывание телекоммуникационной сети является типичным географическим процессом [17]. Если оценивать состояние процесса в некоторый момент времени, то целесообразно выделить группу пространственных подходов. К таковым могут быть отнесены подходы, для которых характерно изучение географически распределенной телекоммуникационной сети, географическая генерализация (оперирование не отдельными телекоммуникационными устройствами, а их системами в рамках города, региона, государства, группы государств и глобальной сети) и применение алгоритмов пространственного анализа. Изучение литературы показало, что существующие исследования могут быть сгруппированы в два подхода, которые с неко-

торой условностью названы «внешне-блокирующий» и «топологический». Третий подход, названный «географический», ранее не существовал и был создан в ходе нашего исследования.

Внешне-блокирующий подход. Его суть заключается в обнаружении (вычислении) критической географической точки на линии связи, соединяющей некоторое государство с остальным миром. Эта точка (возможна и линия как последовательность точек) считается критической в том смысле, что ее отключение (подрыв) приведет к телекоммуникационному блокированию государства. При этом связь внутри государства может функционировать, но без соединения с зарубежными абонентами. Основу такого подхода составляют геополитические концепции (см. специальный выпуск журнала *Hérodote* за 2014 г., № 1–2). В качестве примера можно привести статью французских ученых по «кибергеополитике» [18], в которой идентифицировались критические географические точки для отключения Ливана, Сирии и Ирана от Интернета. Здесь важно понимать, что внешняя блокировка государства возможна при небольшом количестве критических точек, а при их увеличении и географическом распределении становится очень сложно практически реализовать такое отключение. Что касается Российской Федерации, то оценка влияния трансграничных оптоволоконных переходов на телекоммуникационную связность отечественных городов [12] не подтвердила возможность реализации рассматриваемого подхода к нашей стране, но позволила выявить ряд городов, электросвязь в которых очень зависит от зарубежных операторов.

Топологический подход. На основе теории графов можно определить критически важные элементы телекоммуникационной сети. Для этого линии и узлы связи представляются в виде ребер и вершин неориентированного графа, а количественная оценка степени, центральности, доступности, порядка соседства и транзитности каждой вершины [17] позволяет выявить критические узлы. Если оперировать степенью вершины (количество ребер, примыкающих к вершине), то наиболее критически важный узел должен иметь максимальную степень. Такой узел можно назвать хабом или концентратором, а от его бесперебойного функционирования будет зависеть устойчивость всей сети [19, 20]. Кроме этого, центральность и другие параметры можно определить и для линий связи [17]. Топология сети в определенной мере учитывается при реализации других подходов: в полно связной сети (любые две вершины соединены ребром) без дополнительных критериев невозможно выявить критические узлы и линии связи, так как у них одинаковые значения сетевых параметров, а в древовидных и подобных им топологиях критичность узла зависит от его положения на «стволе дерева» или «общей шине» [17].

Географический подход. В отличие от других подходов, это направление разработано на основе теории общественной географии, а точнее, концепции экономико-географического положения, сформулированной Н.Н. Баранским в 1929 г. [21] и получившей дальнейшее развитие [17]. Основная идея подхода заключается в определении критичности узлов и линий связи с помощью оценки их экономико-географического положения в телекоммуникационной сети. Для этого можно воспользоваться представлением об одной из разновидностей экономико-географического положения — инфокоммуникационно-географическом положении [17]. Согласно ему, значимость (критичность) объекта зависит от параметров сформированной им региональной сети. Тогда чем больше у оцениваемого объекта региональная сеть, тем больше его критичность. В нашем случае региональная сеть некоторого узла (объекта) — это взаимосвязанное множество других узлов, отделяющихся от единой национальной сети в случае прекращения работы оцениваемого узла. Отсюда можно сформулировать следующее определение: под критической телекоммуникационной инфраструктурой понимаются узлы и линии связи, случайное или преднамеренное отключение которых приводит к последующему отключению других узлов и линий.

Географическая генерализация позволила рассматривать город в качестве узла связи, что сделано для дополнения ранее проведенных исследований по телекоммуникационной связности российских городов [12, 17]. Из всех каналов электросвязи выбраны волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), включая подводные линии (ПВОЛС). По оптоволоконным линиям передается основной объем телекоммуникационного трафика [22]. Обычно ВОЛС прокладываются вдоль автомобильных и железных дорог. Если параллельно друг другу и на небольшом расстоянии идут линии нескольких операторов связи, то на мелкомасштабных картосхемах этот пучок ВОЛС может быть представлен как одна линия связи. Дополнительным основанием для такой генерализации служит техническая (военно-техническая) возможность повреждения сразу нескольких параллельных ВОЛС в результате несогласованных земляных работ или целенаправленной диверсии. Еще одно ограничение связано с рассмотрением единой сети связи в пределах государства, т. е. без учета трансграничных оптоволоконных переходов и взаимодействия с зарубежными операторами связи. Это сделано для исключения геополитического риска [12].

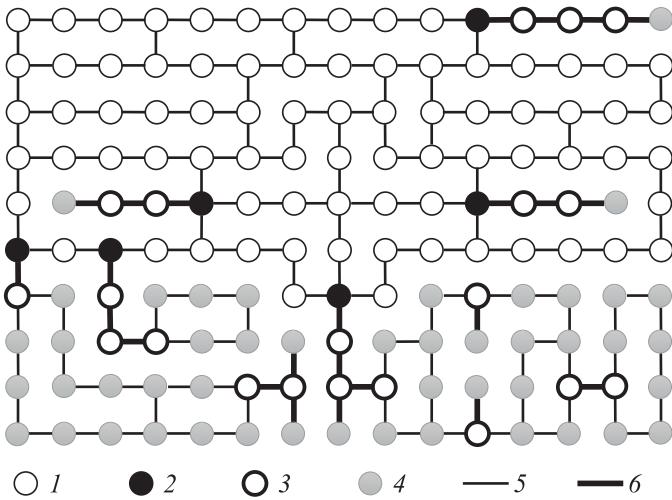


Рис. 1. Принципиальная схема географически распределенной оптоволоконной сети.
Составлена автором.

Узлы связи: 1 — обычные, 2 — критические, 3 — критически-зависимые, 4 — зависимые. Линии связи: 5 — обычные, 6 — критические.

В контексте географического подхода линия связи может быть критической (ее нарушение ведет к отключению как минимум одного узла) или обычной (прекращение работы не влияет на сеть за счет перенаправления трафика по другим маршрутам). Для городов целесообразно выделять обычный (отключение не влияет на сеть), критический (нарушается связность сети путем отделения

одного или нескольких узлов), критически-зависимый (является критическим для одних, но зависит от других узлов) и зависимый (функционирование обусловлено другими элементами сети) узлы. При увеличении в сети числа кольцеобразных структур количество критических и зависимых узлов стремится к минимуму. Однако с целью экономии в государствах с большой территорией оптоволоконные сети создаются путем чередования кольцеобразных и древовидных топологий. В итоге получается ситуация (рис. 1), когда большая часть узлов входит в те или иные кольца, а на периферии (внешней и внутренней) появляются зависимые узлы. При этом зависимость может быть разной. Например, функционирование крайнего узла в правом верхнем углу (см. рис. 1) зависит от нормальной работы четырех критических (критически-зависимых) узлов, а крайнего узла в правом нижнем углу — от шести критических узлов. Критичность узла (линии) может определяться числом зависимых узлов. Однако в действительности узлы (города) имеют разный размер. Поэтому более корректно учитывать людность городов. Тогда наиболее критически важным узлом сети будет тот город, от которого зависит наличие связи в других городах с наибольшей суммарной численностью населения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выявление критических элементов проводилось на основе авторской базы данных о линиях электросвязи Российской Федерации, сформированной по отчетам отечественных операторов связи на 1 января 2022 г., и данным Росстата о численности населения российских городов на 1 января 2022 г. [23]. На указанную дату в России было 1117 городов, из них шесть — Верхоянск и Среднеколымск в Республике Саха (Якутия), Северо-Курильск в Сахалинской области, Анадырь, Билибино и Певек в Чукотском автономном округе — не были подключены к единой оптоволоконной сети (использовалась только спутниковая связь). Кроме этого, топология российской оптоволоконной сети такова, что узлами являлись 36 населенных пунктов не в статусе города (поселок городского типа или сельское поселение). Они учитывались только при выделении критических линий связи, а все расчеты по узлам выполнялись для 1111 городов.

Для формализации выявления критических элементов были построены неориентированный граф G (1147 вершин, из них 36 — вспомогательные вершины), его отображение в виде симметричной матрицы $\{G\}$ (при наличии линии связи между узлами N_i и N_j в ячейке ij ставилась единица, а при отсутствии линии связи — 0; в ячейках главной диагонали фиксировалась численность населения каждого города P_i) и имитационный маршрутизатор M (на графе G определял все возможные маршруты между узлами N_i и N_j). На этой основе разработан следующий алгоритм: 1) имитируется отключение узла N_i ; 2) с помощью M определяется, существуют ли узлы (вершины) на G , между которыми прерывается связь из-за отключения N_i (если «да», то N_i становится критическим узлом и алгоритм продолжается, а если «нет» — обычным узлом и операции по данному узлу прекращаются); 3) $\{G\}$ трансформируется в $\{G'\}$ путем обнуления всех связей N_i и образования несвязанных друг с другом графов G_1 и G_2 ; 4) по главной диагонали $\{G'\}$ подсчитывается суммарная людность городов, входящих в G_1 и G_2 , и устанавливается неравенство $\Sigma P_j(G_1) > \Sigma P_k(G_2)$, из которого следует, что G_1 — это уменьшенная (на G_2) оптоволоконная сеть, а G_2 — отделившаяся часть ($\Sigma P_k(G_2)$ определяет величину критичности N_i); 5) предыдущие четыре операции применяются ко всем вершинам графа G .

с целью определения списка критических узлов; 6) на G сравниваются каждые две вершины из списка критических узлов, соединенные ребром, и определяется, зависит ли функционирование одной вершины от другой, что позволяет выделить критические и критически-зависимые узлы; 7) на G выявляются вершины, продолжающие функционировать при отключении какой-либо вершины (обычные узлы), и зависимые узлы, которые теряют связь с единой сетью из-за отключения какого-то узла. Результаты, полученные для узлов, могут использоваться при выделении критических линий связи (ребро между критическим и критически-зависимым узлом или зависимым узлом, являющимся конечным в сети), а оставшиеся на G ребра будут трактоваться как обычные линии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Реализация алгоритма, предложенного выше, позволила выявить в единой оптоволоконной сети Российской Федерации 168 критических узлов (городов), из них 60 оказались критическо-зависимыми узлами. Если считать, что наиболее критически важный узел формирует зависимую сеть из городов с суммарной численностью не менее 100 тыс. чел., то таковых набралось 26. Они неравномерно распределены по федеральным округам России (рис. 2). Параметры первых десяти критических узлов, ранжированных по численности населения зависимых узлов, приведены в табл. 1. В остальную часть

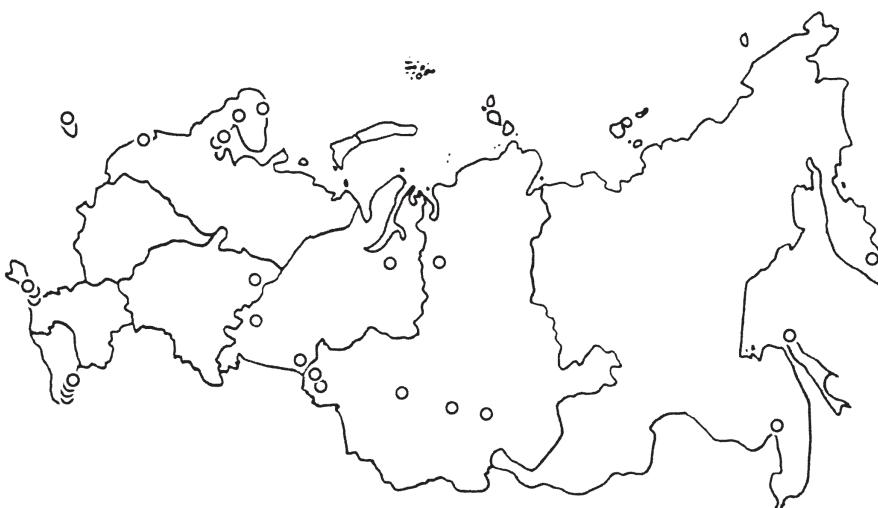


Рис. 2. Размещение в федеральных округах России оптоволоконных узлов (пунсонов), отключение каждого из которых лишит электросвязи другие города с суммарной численностью населения более 100 тыс. чел. Составлено по авторской базе данных о российских линиях электросвязи и данным Росстата [23] о численности населения на 1 января 2022 г.

Таблица 1

Наиболее критически важные узлы в оптоволоконной сети Российской Федерации

Ранг	Критический узел (город)	Регион, в котором расположен критический узел	Число зависимых узлов (городов)	Численность населения, тыс. чел.	
				критический узел	зависимые узлы
1	Ишим	Тюменская область	168	63,6	15 453,9
2	Называевск	Омская область	167	10,5	15 443,4
3	Омск	Омская область	166	1126,2	14 317,2
4	Тайшет	Иркутская область	96	32,1	6658,4
5	Станица Тамань	Краснодарский край	17	11,9	1454,0
6	Хабаровск	Хабаровский край	14	613,5	1325,1
7	Керчь	Республика Крым	16	150,9	1303,1
8	Пос. Приморский	Республика Крым	15	12,6	1293,2
9	Кингисепп	Ленинградская область	23	43,8	802,5
10	Беломорск	Республика Карелия	18	8,7	648,1

Примечание. Составлено по авторской базе данных о российских линиях электросвязи и данным Росстата [23] о численности населения на 1 января 2022 г.

ранжированного ряда (с 11-го по 26-й ранг) вошли следующие города: Кемь (Республика Карелия), Кандалакша (Мурманская область), Махачкала (Республика Дагестан), Калининград (Калининградская область), Оха (Сахалинская область), Красноярск (Красноярский край), Каспийск (Республика Дагестан), Новый Уренгой (Ямало-Ненецкий автономный округ), Игарка (Красноярский край), Елизово (Камчатский край), Избербаш (Республика Дагестан), Томск (Томская область), Екатеринбург (Свердловская область), Дагестанские Огни (Республика Дагестан), Мурманск (Мурманская область) и Березники (Пермский край).

Целесообразно особо отметить те критические узлы, отключение которых может привести к лишению связи с одним или несколькими регионами: отключение Ишима, Называевска или Омска прервает связь с Сибирским и Дальневосточным федеральными округами, Тайшета — с Иркутской областью и Дальневосточным федеральным округом, Хабаровска — с Приморским краем, станицы Тамань — с Республикой Крым и Севастополем, Кингисепп — с Калининградской областью, Беломорска или Кеми — с Мурманской областью, Охи — с Камчатским краем. Общее распределение анализируемых городов по типам узлов приведено в табл. 2. Если оперировать их людностью (табл. 3), то можно прийти к следующим выводам: основу отечественной сети составили обычные узлы, людность которых неравномерно уменьшалась по мере удаления от центра (примерно от 79 до 60 % в Приволжье и 64 % на Урале) при полном исчезновении таких узлов за Уралом. Зависимые и критически-зависимые узлы слабо представлены в центре (примерно 3 % численности населения), возрас-

Таблица 2

Количество узлов разных типов в федеральных округах России

Федеральный округ	Тип узла (города) в оптоволоконной сети				Всего
	обычный	критический	критически-зависимый	зависимый	
Центральный	188	47	7	62	304
Северо-Западный	73	16	7	52	148
Южный	62	6	3	25	96
Северо-Кавказский	45	4	4	5	58
Приволжский	140	21	5	34	200
Уральский	79	14	3	19	115
Сибирский	0	0	20	94	114
Дальневосточный	0	0	11	65	76
Итого	587	108	60	356	1111

Приложение. Составлено автором по состоянию на 1 января 2022 г.

Таблица 3

Распределение количества городских жителей (тыс. чел.) по типам узлов и федеральным округам России

Федеральный округ	Тип узла (города) в оптоволоконной сети				Всего
	обычный	критический	критически-зависимый	зависимый	
Центральный	23 998,8	5492,7	98,5	801,3	30 391,3
Северо-Западный	8257,5	1266,5	885,5	771,3	11 180,8
Южный	7181,0	921,4	243,6	1567,8	9913,8
Северо-Кавказский	3 610,9	692,7	247,0	186,5	4737,1
Приволжский	11 757,9	6949,3	195,3	592,9	19 495,4
Уральский	6101,9	2900,7	56,7	526,0	9585,3
Сибирский	0	0	3757,8	7790,7	11 548,5
Дальневосточный	0	0	1391,9	3664,5	5056,4
Итого	60 908,0	18 223,3	6876,3	15 901,0	101 908,6

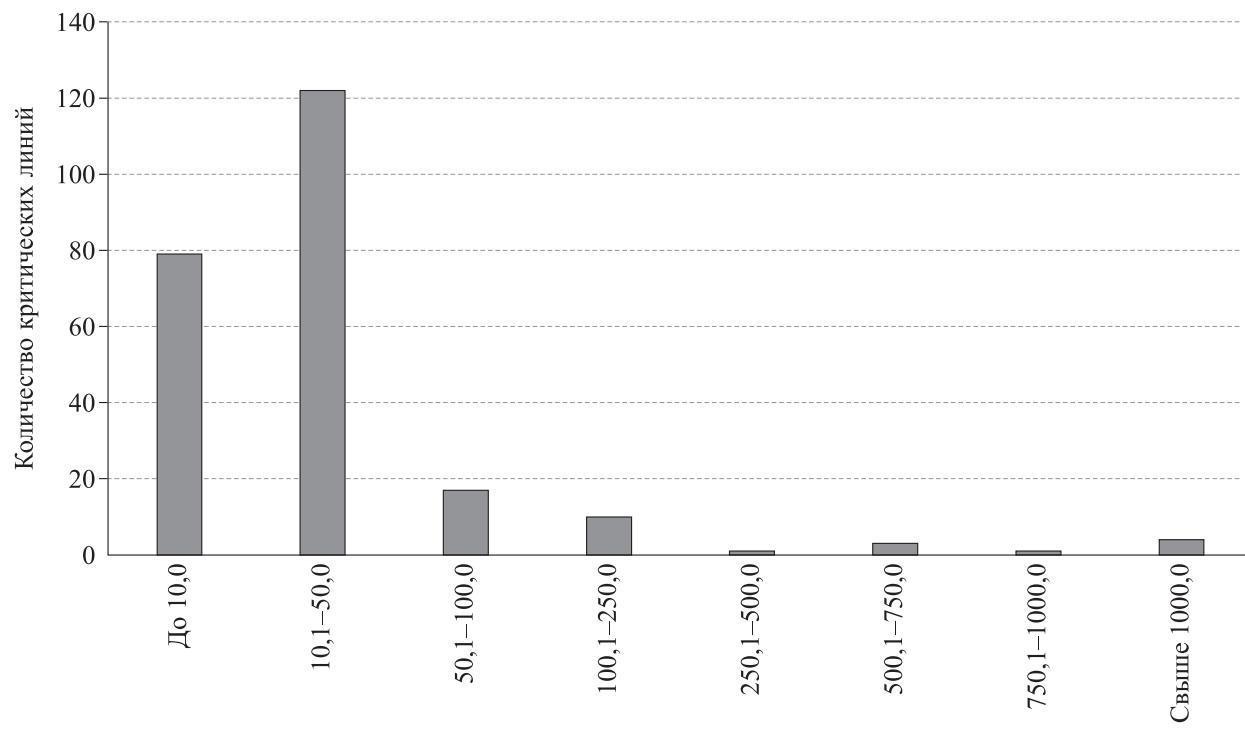
Приложение. Составлено по авторской базе данных о российских линиях электросвязи и данным Росстата [23] о численности населения на 1 января 2022 г.

таят на север (15 %) и юг (18 %) от центра при последующем снижении на Северном Кавказе (9 %), в Приволжье (4 %) и на Урале (6 %), после чего следует их доминирование (100 %) в Сибири и на Дальнем Востоке. Критические и критически-зависимые узлы в четырех западных федеральных округах имеют меньший удельный вес (от 12 до 20 %), чем в четырех восточных округах (от 28 до 37 %).

С учетом расположения критических, критически-зависимых и зависимых узлов выявлены критические линии связи. Наиболее критически важным элементом телекоммуникационной инфраструктуры России оказалась линия Ишим–Называевск (от ее исправности зависит связь с 15 453,9 тыс. чел. в 190 городах Сибирского и Дальневосточного федеральных округов). Если рассматривать все критические линии, то большинство из них проложено до отдельных городов или групп городов с суммарной численностью населения не более 50 тыс. чел. (рис. 3). Это указывает на периферийность большинства критических линий связи. Здесь под периферийностью понимается отсутствие экономической целесообразности создания кольцеобразной топологии для окраинных городов, что не исключает политической и геополитической целесообразности формирования надежной (многосвязной) топологии для отечественной оптоволоконной сети.

Обсуждение полученных результатов обычно проводится путем сравнения с предыдущими аналогичными исследованиями. Однако ранее российские города как критические телекоммуникационные узлы никем не выделялись. Поэтому полученные результаты будут интерпретированы только с позиции исследовательских ограничений, имитации одновременного отключения нескольких критических элементов и рекомендаций по прокладке новых линий связи.

Первое ограничение, связанное с рассмотрением исключительно городов, позволило сосредоточиться на анализе потенциальной устойчивости электросвязи для большинства населения России. Однако полный анализ общероссийской ситуации требует изучения критичности подключения к единой оптоволоконной сети также поселков городского типа и сельских населенных пунктов, что в настоящее время невозможно сделать из-за отсутствия сведений по ряду таких поселений. Второе ограничение исключило из рассмотрения радиорелейную и спутниковую связь из-за их незначительной доли в общероссийском трафике, стоимости и величины задержки сигнала. Вместе с тем их роль



Численность населения городов (тыс. чел.), зависящих от одной критической линии

Рис. 3. Количество критических оптоволоконных линий России, отключение каждой из которых приведет к лишению связи разного числа городских жителей. Составлено по авторской базе данных о российских линиях электросвязи и данным Росстата [23] о численности населения на 1 января 2022 г.

в дублировании наиболее критических элементов оптоволоконной сети весьма важна, но дополнительная пропускная способность под эти задачи до сих пор не резервировалась по причине отсутствия сведений о критических узлах и линиях. Третье ограничение — изучение только внутрироссийской сети без учета зарубежных линий связи — позволило оценить автономное функционирование отечественной оптоволоконной сети, но лишило возможности ранжировать зарубежные линии связи по их критической важности для дублирования трафика в случае отключения тех или иных российских узлов (линий). Четвертое ограничение, обусловленное рассмотрением телекоммуникационной ситуации на 1 января 2022 г., дало наиболее актуальную оценку, но не позволило подойти к пониманию процесса развертывания (свертывания) критических элементов, для чего необходимы длинные временные ряды данных, а методология уже отработана на 1620-месячном ряде данных о развертывании почтовой сети Сибири [17]. Перечисленные ограничения могут быть сняты в ходе дальнейших исследований.

На основе неориентированного графа G , симметричной матрицы $\{G\}$ и имитационного маршрутизатора M можно рассчитать критичность одновременного отключения двух и более узлов. Для этого в предложенном алгоритме в первой операции имитируется отключение не одного, а нескольких узлов. Перебор всех возможных пар, троек, четверок и большего количества узлов позволяет выявить наиболее критически важные сочетания узлов и связанных с ними линий связи. Если взять, к примеру, сочетание из семи узлов, то наиболее критично одновременное отключение Ишима, Тамани, Кингисеппа, Беломорска, Махачкалы, Нового Уренгоя и Екатеринбурга (от них зависит наличие связи для 19 061,6 тыс. чел., не считая суммарную людность перечисленных семи поселений). Кроме этого, открывается возможность идентификации минимального набора узлов (линий), от которых зависит функционирование отдельного региона или группы регионов России при работе тех или иных критических узлов. Например, связь во всех городах Республики Саха (Якутия) зависит (при условии нормальной работы узлов Ишим, Называевск, Омск и Тайшет) в первую очередь от функционирования ВОЛС Тында–Нерюнгри и во вторую очередь — от ПВОЛС Сахалин–Магадан (Оха–Ола), которая соединена с ВОЛС «Колымский экспресс» (Якутск–Магадан).

Прикладной аспект полученных результатов связан с определением маршрутов для новых оптоволоконных линий, создание которых позволит превратить критические элементы в обычные узлы и линии связи. Различные варианты прокладки новых ВОЛС и ПВОЛС, повышающих связность единой оптоволоконной сети России, предлагались нами ранее [12], но они не были связаны с критичностью узлов. Вполне возможно, что в ближайшие 3–4 года некоторые из наших прежних предложений реализуются в виде ПВОЛС «Полярный экспресс» (Мурманск–Певек–Анадырь–Петропавловск–Камчатский–Южно–Сахалинск–Владивосток), что переведет наиболее критически важные узлы в Северо–Западном, Уральском, Сибирском и Дальневосточном федеральных округах в статус обычных узлов. Однако развитие телекоммуникационных технологий предъявляет новые требования к качеству связи, и в первую очередь к величине задержки сигнала [12]. Поэтому, например, отключение Тайшета может быть нивелировано за счет перенаправления трафика через ПВОЛС «Полярный экспресс», но тогда будет очень большая задержка сигнала. Отсюда возникает необходимость создания оптоволоконных линий в других, не столь далеких географических направлениях относительно выявленных критических узлов. К примеру, Тайшет может быть закольцован через ВОЛС Братск–Кодинск, а Ишим, Называевск и Омск — через ВОЛС Татарск–Тара–Тобольск.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация географического подхода к идентификации критической телекоммуникационной инфраструктуры России, опирающаяся на концепцию экономико–географического положения, авторский алгоритм выявления критических элементов, данные об отечественных линиях электросвязи и численности населения российских городов, позволила обнаружить 108 критических, 60 критически–зависимых и 356 зависимых узлов (городов) в единой общероссийской оптоволоконной сети, объединяющей 1111 городов. Ранее в мировой науке такие общественно–географические исследования не проводились. Практическая значимость полученных результатов может быть связана с разработкой телекоммуникационных мероприятий по повышению устойчивости (связности) оптоволоконной сети за счет прокладки новых линий связи в обход выявленных критических элементов.

Дальнейшие исследования по данной проблематике могут осуществляться в следующих направлениях: а) устранение существующих ограничений (перечислены выше); б) разработка новых геогра-

фических подходов; в) формирование национальной стратегии обеспечения устойчивости единой оптоволоконной сети. Для последнего направления задание определенного уровня связности (топологии) сети в рамках информационно-технических наук не является достаточным, так как важна не топология сама по себе, а соединение конкретных населенных пунктов в устойчивые телекоммуникационные районы (территориальные комплексы), что может быть выполнено только в рамках общественной географии. Что касается географических подходов, то необходимо проанализировать имеющиеся общественно-географические концепции (те из них, которые могут использоваться для анализа процесса развертывания телекоммуникационной сети, перечислены в [17]) с целью определения теоретической основы нового подхода. Не исключено, что такой основой может стать концепция пространственной диффузии инноваций (см. обзор в четвертой главе в [17]). Тогда будет два географических подхода к идентификации критической телекоммуникационной инфраструктуры, что потребует их разграничения на уровне наименования. Поэтому наш подход может превратиться из «географического» в «позиционно-географический», а новый подход станет «диффузионно-географическим».

Работа выполнена за счет средств государственного задания (номер регистрации темы AAAA-A21-121012190018-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lewis T. Critical Infrastructure Protection in Homeland Security: Defending a Networked Nation. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. — 486 p.
2. Harašta J. Legally critical: Defining critical infrastructure in an interconnected world // International Journ. of Critical Infrastructure Protection. — 2018. — Vol. 21. — P. 47–56.
3. Newbill C.M. Defining critical infrastructure for a global application // Indiana Journ. of Global Legal Studies. — 2019. — Vol. 26, N 2. — P. 761–779.
4. De Felice F., Baffo I., Petrillo A. Critical infrastructures overview: Past, present and future // Sustainability. — 2022. — Vol. 14, N 4. — P. 2233.
5. Pescaroli G., Alexander D. Understanding compound, interconnected, interacting, and cascading risks: A holistic framework // Risk Analysis. — 2018. — Vol. 38, N 11. — P. 2245–2257.
6. Rehak D., Senovsky P., Hromada M., Lovecek T., Novotny P. Cascading impact assessment in a critical infrastructure system // International Journ. of Critical Infrastructure Protection. — 2018. — Vol. 22. — P. 125–138.
7. Luijif E., Klaver M. Analysis and lessons identified on critical infrastructures and dependencies from an empirical data set // International Journ. of Critical Infrastructure Protection. — 2021. — Vol. 35. — P. 100471.
8. Федеральный закон от 26 июля 2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — <http://www.kremlin.ru/acts/bank/42128> (дата обращения 25.12.2022).
9. Степанов-Егиянц В.Г. Критическая информационная инфраструктура России: понятие и вопросы уголовно-правовой охраны // Евраз. юридич. журн. — 2019. — № 2. — С. 265–268.
10. Стародубцев Ю.И., Иванов С.А., Закалкин П.В. Концептуальные направления решения проблемы обеспечения устойчивости Единой сети электросвязи Российской Федерации // Военная мысль. — 2021. — № 4. — С. 39–49.
11. Магистральные сети связи в России, 2022 // ComNews [Электронный ресурс]. — <https://www.comnews.ru/content/223014/2022-11-28/2022-w48/magist-ralnye-seti-svyazi-rossii-2022> (дата обращения 25.12.2022).
12. Блануца В.И. Географическая экспертиза стратегий экономического развития России. — М.: ИНФРА-М, 2021. — 198 с.
13. Ouyang M. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems // Reliability Engineering and System Safety. — 2014. — Vol. 121. — P. 43–60.
14. Grubesic T.H., Murray A.T. Vital nodes, interconnected infrastructures, and the geographies of network survivability // Annals of the Association of American Geographers. — 2006. — Vol. 96, N 1. — P. 64–83.
15. Haffner J. Critical infrastructures, critical geographies: Towards a spatial theory of the digital divide // Theorizing Digital Divides. — London: Routledge, 2017. — P. 103–116.
16. Rehak D., Senovsky P., Hromada M., Lovecek T. Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements // International Journ. of Critical Infrastructure Protection. — 2019. — Vol. 25. — P. 125–138.
17. Блануца В.И. Развёртывание информационно-коммуникационной сети как географический процесс (на примере становления сетевой структуры сибирской почты). — М.: ИНФРА-М, 2016. — 246 с.
18. Robine J., Salamatian K. Envisioning cyber-geography // Hérodote. — 2014. — Vol. 152–153, N 1–2. — P. 123–139.
19. Kim H., O'Kelly M.E. Reliable p-hub location problems in telecommunication networks // Geographical Analysis. — 2009. — Vol. 41, N 3. — P. 283–306.

20. O'Kelly M.E., Kim H., Kim C. Internet reliability with realistic peering // Environment and Planning B: Planning and Design. — 2006. — Vol. 33, N 3. — P. 325–343.
21. Баранский Н.Н. Экономико-географическое положение // Баранский Н.Н. Избранные труды. Становление экономической географии. — М.: Мысль, 1980. — С. 128–159.
22. Конышев В.А., Леонов А.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Оптическая революция в системах связи и ее социально-экономические последствия // Прикладная фотоника. — 2016. — Т. 3, № 1. — С. 15–27.
23. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2022 года // Федеральная служба государственной статистики (Росстат) [Электронный ресурс]. — <https://rosstat.gov.ru/-compendium/document/13282> (дата обращения 25.12.2022).

Поступила в редакцию 30.01.2023

После доработки 15.02.2023

Принята к публикации 23.11.2023
