

М.В. ИВАНОВ, И.В. КАЛАШНИКОВ, М.М. НУРУЛЛАЕВ
**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ СЕТИ
ИНТЕРНЕТ НА ОСНОВЕ МЕТАГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ**

Иванов М.В., Калашников И.В., Нуруллаев М.М. Исследование структурных свойств сети Интернет на основе метаграфовых моделей.

Аннотация. При исследовании сети Интернет ее структуру разделяют на уровни: уровень автономных систем, уровень точек присутствия операторов связи, уровень оборудования и так далее. На каждом из них глобальная сеть может быть описана в виде графа на основании исходных данных, получаемых из открытых источников. Рассмотрение сети в рамках отдельного уровня упрощает анализ, однако не позволяет системно оценить ее структурные свойства при решении задач обеспечения связности нескольких сегментов сети, относящихся, в частности, к объектам критической информационной инфраструктуры. Для преодоления этого противоречия разработана математическая модель глобальной сети на стыке уровня автономных систем и уровня точек присутствия операторов связи в виде метаграфа, которая учитывает особенности каждого из уровней и позволяет находить «узкие» места как в системе междоменной маршрутизации, так и в топологии внутренних сетей интернет-провайдеров.

На основе предложенной модели описаны некоторые структурные феномены глобальной сети: тупиковые, многоинтерфейсные и транзитные автономные системы, контент-провайдеры. С учетом доступных в открытых источниках данных о структуре сети Интернет предложен способ построения метаграфа. Проведен сравнительный анализ инструментов, автоматизирующих процесс анализа модели сети. Сформулированы ориентированные на практику задачи поиска разрезающего подмножества в метаграфе. Определены направления дальнейших исследований – программная реализация инструментов анализа структуры глобальной сети с использованием общедоступного модуля MGtoolkit на языке Python и оценивание структурных феноменов российского сегмента сети Интернет.

Ключевые слова: сеть Интернет, автономная система, точка присутствия оператора связи, маршрутизация, BGP, метаграф, разрезающее подмножество, Python, MGtoolkit, объекты критической информационной инфраструктуры.

1. Введение. Сеть Интернет представляет собой инфокоммуникационный фундамент современного общества и является объектом исследования специалистов в области связи, информационной безопасности, маркетинга, социологии и других отраслей знаний. Причинами, по которым интерес к глобальной сети не ослабевает, являются ее количественные и качественные изменения. С одной стороны, растет количество пользователей, появляются новые дата-центры и линии связи, изменяется множество телекоммуникационных протоколов (используемый сегодня де-факто стек протоколов с трудом описывается какой бы то ни было эталонной моделью взаимодействия). С другой стороны, появляются новые подходы к оптимизации трафика в глобальной сети, и наряду с уже ставшими привычными пиринговыми сетями и сетями доставки контента (Content Delivery Network, CDN)

появляются новые парадигмы построения глобальной сети: контент-ориентированные сети (Content Centric Networking), сети именованных данных (Named Data Networking), программно-конфигурируемые сети (Software Defined Networks, SDN) и другие.

Настоящая работа может быть охарактеризована как постановочная, ее цель – показать возможность применения математического аппарата метаграфов для построения описательных моделей сети Интернет. Создание таких моделей и изучение их свойств позволит решить задачи структурного анализа существующих сетей на предмет их устойчивости в условиях деструктивных воздействий, а в дальнейшем перейти к созданию прогнозных моделей поведения сетей, в частности, спрогнозировать появление новых связей между интернет-провайдерами.

Для достижения цели необходимо провести анализ текущего состояния области исследования и анализ источников исходных данных, формально описать метаграфовую модель глобальной сети на смежных уровнях, разработать способ построения метаграфа на основе данных из открытых источников и предложить некоторые варианты использования предложенной модели.

2. Текущее состояние области исследования. Структура современной глобальной сети очень сложна и для анализа ее целесообразно декомпозировать на уровни. Как выделить эти уровни? И если рассматривать сеть в виде графа, какие сущности будут описываться вершинами, а какие – ребрами графа на каждом из уровней?

Традиционно сеть рассматривается через призму какой-либо эталонной модели, например OSI или TCP/IP. Это позволяет создавать микромодели глобальной сети, описывающие технические и технологические аспекты взаимодействия сетевых узлов. Для построения макромоделей они не подходят, поскольку не учитывают объективные особенности построения сетей интернет-провайдеров и их взаимодействия.

При выборе средств моделирования и анализа сложной системы рационально отталкиваться не от других ее моделей, а от реальных свойств объекта исследования. Согласно этому утверждению в сети Интернет выделяют четыре взаимосвязанных уровня [1]: уровень межсетевых протоколов (Internet Protocol, IP), уровень маршрутизаторов, уровень точек присутствия (Point of Presence, PoP) и уровень автономных систем (AC, Autonomous System, AS).

Уровень IP (IP Level) описывает глобальную сеть как множество узлов, способных передавать друг другу данные посредством сетевых интерфейсов, идентифицируемых IP-адресами. При решении большинства практически значимых задач используется информация о сети

именно на уровне IP. Поскольку один маршрутизатор может иметь до нескольких сотен интерфейсов, множество вершин на IP Level могут относиться к одному физическому устройству.

На уровне маршрутизаторов (Router Level) сеть представима в виде графа, вершинами которого являются сетевые устройства третьего уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем, осуществляющие продвижение (forwarding) пакетов. К таковым относятся собственно маршрутизаторы и маршрутизирующие коммутаторы. В открытом доступе нет достоверных и полных источников данных о структуре сети на Router Level, поэтому для исследования этого уровня применяются различные методики объединения нескольких IP Level-вершин в одну Router Level-вершину. Множество таких устройств разных провайдеров размещаются на специальных технических площадках – точках присутствия.

Уровень точек присутствия (PoP Level) позволяет осветить вопрос физического размещения сетевых устройств. Именно на этом уровне понятия географический масштаб сети оператора связи и его ниша на рынке телекоммуникационных услуг, однако информация о PoP распространяется операторами связи очень ограниченно. По аналогии с уровнем маршрутизаторов для изучения данного уровня применяются различные методики взаимоувязки Router Level-вершин.

Уровень автономных систем (AS Level) является наиболее общим и позволяет представить сеть не как совокупность устройств и линий связи, а как совокупность провайдеров со своими интересами. Именно на этом уровне, анализируя маршрутную политику, можно попытаться понять весь спектр экономических отношений между ними. Существует несколько актуальных и доступных источников информации о взаимосвязях автономных систем.

Однако рассмотрение структуры сети на отдельно взятом уровне может привести к неверным выводам, поскольку:

- не в полной мере учитываются экономические особенности межпровайдерских отношений, выражающиеся в гибридной (hybrid) маршрутной политике, когда два интернет-провайдера на различных точках присутствия анонсируют друг другу различные множества маршрутов, или префикс-ориентированной (prefix-specific) маршрутной политике, когда маршрут выбирается в зависимости от адреса источника;

- правила выбора глобальных маршрутов не всегда соответствуют описанным в руководящих документах (RFC и прочих), по некоторым оценкам от 14 до 35 % фактически наблюдаемых междоменных маршрутов отличаются от потенциальных маршрутов, рассчитан-

ных только на основе знания структуры глобальной сети на уровне автономных систем [2]. Зачастую сильное влияние оказывают оверлейные сети [3];

– системы управления оптическими транспортными сетями и системы управления качеством обслуживания абонентов (балансировка трафика, traffic engineering) начинают работать согласованно под управлением SDN-контроллеров [4].

С другой стороны, одновременное исследование сети на нескольких уровнях затруднено по следующим причинам:

– неоднозначность взаимного соответствия данных о структуре глобальной сети на IP Level и Router Level [5], а также на AS Level и PoP Level [6-8];

– невысокая полнота и достоверность данных о структуре сетей на PoP Level и Router Level [9, 10];

– большие объемы исходных данных [11].

3. Анализ источников исходных данных. Возможным направлением получения новых знаний о глобальной сети является исследование стыка двух уровней – уровня АС и уровня точек присутствия операторов.

Автономная система – это совокупность маршрутизируемых диапазонов IP-адресов под единым административным управлением с общей, однозначно определенной политикой маршрутизации. Другими словами, АС – это сеть интернет-провайдера (Internet Service Provider, ISP). Деление глобальной сети на АС позволяет разделить глобальную систему маршрутизации на области с четким внутренним контролем и относительно высокой степенью безопасности и на «межоблачное» пространство, основанное на кооперации и взаимодоверии [12].

Каждая АС имеет уникальный номер и управляет как минимум одним диапазоном IP-адресов. Например, AS12389 (здесь и далее перед номером АС будет написана аббревиатура AS) ROSTELECOM управляет 954 диапазонами, а AS34629 ORNRRU – только шестью. В середине 1990-х годов было зарегистрировано около 1000 АС, а по состоянию на июль 2020 года – более 110 000 АС.

На AS Level структура сети известна в рамках системы междоменной маршрутизации, а в качестве источника исходных данных целесообразно использовать системы сбора маршрутной информации (ССМИ) [13-15]. ССМИ предоставляют доступ к собранным ими данным через веб-интерфейс, проприетарные утилиты или в виде файлов, доступных по протоколу File Transfer Protocol (FTP). Файлы делятся на два типа: файлы с «сырыми» маршрутными объявлениями (пакеты типа BGP-Update) и файлы с актуальными таблицами маршрутизации –

результатом обработки пакетов BGP-Update на том или ином пограничном маршрутизаторе (AS Border Router, ASBR). Для анализа данных применяются общедоступные инструменты [16, 17].

В результате анализа исходных данных сеть может быть представлена как граф (далее – АС-граф), вершинами которого являются АС, а ребрами – пары АС, возникающие при объявлениях маршрутов между АС по протоколу BGP [18]. Поскольку система маршрутизации в сетях IP работает от адреса назначения, АС-граф является направленным: направления ребер совпадают с направлением передачи трафика и противоположны направлению объявления маршрутов между АС [19]. На рисунке 1 проиллюстрирован процесс создания АС-графа на основе атрибута AS_PATH из пакета BGP-Update. Поскольку АС-граф формируется в результате рассылки маршрутного объявления до конкретного IP-префикса, количество АС-графов совпадает с количеством анонсируемых в глобальной сети IP-префиксов. В этой ситуации связь между двумя АС может присутствовать в одном АС-графе и отсутствовать в другом. На практике это проявляется либо в форме гибридной, либо в форме префикс-ориентированной маршрутной политики интернет-провайдеров [2].

```

* Border Gateway Protocol - UPDATE Message
  Marker: ffffffffffffffffffffffffffffffffff
  Length: 118
  Type: UPDATE Message (2)
  Withdrawn Routes Length: 0
  Total Path Attribute Length: 91
* Path attributes
  > Path Attribute - ORIGIN: IGP
  > Path Attribute - AS_PATH: (3257 3491 20485 28840)
  > Path Attribute - NEXT_HOP: 188.128.104.51
  > Path Attribute - MULTI_EXIT_DISC: 0
  > Path Attribute - LOCAL_PREF: 200
  > Path Attribute - COMMUNITIES: 3257:8077 3257:30276
  > Path Attribute - ORIGINATOR_ID: 188.128.104.51
  > Path Attribute - CLUSTER_LIST: 0.0.2.224
* Network Layer Reachability Information (NLRI)
  > 178.207.32.0/19

```

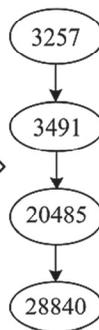


Рис. 1. Использование протокола BGP для синтеза АС-графа

Понятие *точка присутствия* не стандартизовано, но в большинстве случаев под ней понимается географически сосредоточенная совокупность коммутационного оборудования оператора связи, к которому возможно подключение клиентов [20].

На PoP Level ситуация с получением исходных данных для исследования отличается, поскольку обычно у интернет-провайдеров нет необходимости делиться с кем-либо информацией о структуре своей внутренней сети. Несмотря на это, крупные и средние провайдеры, которые проводят открытую или выборочную политику пиринга, размещают в открытом доступе ограниченные сведения о точках присутствия, на которых они технически способны организовывать обмен inter-AS трафиком [21, 22]. В этом случае для каждой точки присутствия известен почтовый адрес и/или географические координаты, однако топология внутренней сети провайдера остается неизвестной. В контексте настоящего исследования будем считать, что все точки присутствия, относящиеся к данной АС, попарно взаимно достижимы.

Неотъемлемой частью современной транспортной инфраструктуры глобальной сети являются точки обмена трафиком (Internet eXchange Point, IXP). IXP зачастую не является «точкой», фактически это совокупность технологических площадок в рамках города или страны, которые соединены высокоскоростными каналами передачи данных [23] и предназначены для организации межсетевое взаимодействия интернет-провайдеров. Внутренняя структура сети IXP скрыта от участников обмена трафиком, поэтому для них она и является «точкой»: имея оборудование лишь на одной PoP точки обмена трафиком, ее участники соединены со всеми другими участниками, которые физически подключены на других PoP.

Анализ указанных выше источников исходных данных позволяет утверждать, что структура глобальной сети на стыке AS Level и PoP Level характеризуется перечисленными ниже особенностями.

Утверждение 1: любая АС имеет как минимум одну PoP, поскольку в противном случае сеть не имеет возможности обмениваться трафиком с другими сетями и не может являться частью глобальной сети. Неполнота знаний внешнего наблюдателя о точках присутствия операторов связи не влияет на их объективное существование.

Утверждение 2: АС-граф является связным, поскольку любая АС имеет BGP-связность как минимум с одной отличной от нее АС.

4. Математическая модель глобальной сети, учитывающая особенности AS Level и PoP Level. Приведенные особенности позволяют утверждать, что глобальная сеть на стыке AS Level и PoP Level является сложной системой, включающей в себя элементы разных типов. Для описания структуры подобной системы предлагается использовать обобщение понятий граф и гиперграф – метаграф.

Использование метаграфовых моделей для описания телекоммуникационных сетей впервые было предложено в работе [24], в кото-

рой вводится понятие *метасеть* при описании интрасетей. Также известны примеры успешного применения метаграфовых моделей в других отраслях знаний: при планировании маршрутов путешествий [25], исследовании социальных взаимосвязей [26], оценивании семантической близости объектов [27].

Поскольку теория метаграфов является не окончательно сформированной и развивается, формальные определения даны согласно [28].

Определение 1. Порождающее множество метаграфа – это множество элементов, которые представляют собой объекты исследования и которые входят в ребра метаграфа:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (1)$$

Определение 2. Ребро e в метаграфе – это пара $e = \langle V_e, W_e \rangle \in E$ (где E это множество ребер), состоящая из *in*-вершины $V_e \subset X$ и *out*-вершины $W_e \subset X$, каждая из которых может содержать любое количество элементов. Каждый элемент в *in*-вершине (*out*-вершине) является *совходом* (*совыходом*) для других элементов.

Определение 3. Метаграф $S = \langle X, E \rangle$ – это пара, заданная порождающим множеством X и множеством ребер E , которые определены на порождающем множестве.

При исследовании структурных свойств сети Интернет на стыке AS Level и PoP Level определим:

– множество точек присутствия интернет-провайдеров как порождающее множество:

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}; \quad (2)$$

– множество АС сети Интернет как множество *in*-вершин (*out*-вершин):

$$A^{AS} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}. \quad (3)$$

Каждая *in*-вершина (*out*-вершина) является подмножеством порождающего множества согласно утверждению 1: $a_m \subset P^{PoP}$;

– множество ребер метаграфа как множество ребер АС-графа:

$$E^{AS} = \{e_1, e_2, \dots, e_i\}. \quad (4)$$

– метаграф $S^{AS_PoP} = \langle P^{PoP}, A^{AS} \rangle$ является связным согласно утверждению 2.

Введем индикаторную функцию, определяющую принадлежность АС к точке присутствия, и функцию отображения АС на множество точек присутствия:

$$\text{is_AS_on_pop}(a_m, p_n) = \begin{cases} 1, & \text{если оборудование } a_m \text{ расположено на } p_n, \\ 0 & \text{- в противном случае.} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{get_pop_of_AS}(a_m) = P^{a_m}, \quad (6)$$

где $P^{a_m} \subset P^{PoP}$ и $\text{is_AS_on_pop}(a_m, p_n) = 1, \forall p_n \in P^{a_m}$.

Поскольку одной из целей работы является оценивание географического расположения АС, введем индикаторную функцию, определяющую принадлежность точки присутствия к стране, и функцию отображения страны на множество точек присутствия:

$$\text{is_pop_in_country}(p_n, c_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } p_n \text{ расположена в стране } c_i, \\ 0 & \text{- в противном случае.} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{get_pop_of_country}(c_i) = P^{c_i}, \quad (8)$$

где $P^{c_i} \subset P^{PoP}$ и $\text{is_pop_in_country}(p_n, c_i) = 1, \forall p_n \in P^{c_i}$.

Для пояснения предложенной математической модели целесообразно описать с помощью нее некоторые феномены структуры сети Интернет в порядке возрастания их сложности [29].

Подключение тупиковой АС к сети Интернет. Тупиковые (stub) АС подключены к единственной вышестоящей (uplink) АС: uplink обеспечивает доставку исходящего трафика из stub в глобальную сеть и входящего трафика из глобальной сети в stub. В предельном случае stub АС имеет единственную точку присутствия (рис. 2) и выражения (2)-(4) примет следующий вид:

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2\}; \quad E^{AS} = \{e_1\} = \{\{\{p_2\}, \{p_1\}\}\}.$$

Такая модель подключения характерна для мелких организаций, не предъявляющих высоких требований к надежности соединения с сетью Интернет. Такие организации, как правило, не имеют разветвленной локальной сети и географически сосредоточены.

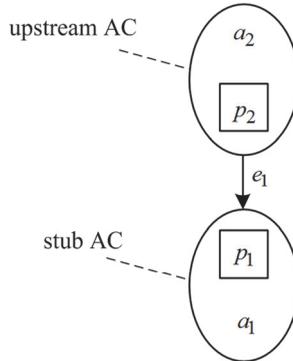


Рис. 2. Метаграф, описывающий подключение тупиковой АС к сети Интернет (вариант с одной PoP)

Если сеть организации развернута в масштабах района или города (что характерно для провайдеров «последней мили») и для нее важна бесперебойная связь с глобальной сетью, используется резервирование соединений с uplink. Возможны следующие варианты резервирования:

– одна точка присутствия stub подключена к нескольким точкам присутствия uplink. Резервируются каналы связи до uplink и оборудование uplink, но не оборудование stub (рис. 3а):

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, p_3\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2\};$$

$$E^{AS} = \{e_1\} = \{\{\{p_2, p_3\}, \{p_1\}\}\};$$

– несколько точек присутствия stub подключены к одной точке присутствия uplink. Резервируются каналы связи до uplink и оборудование stub, но не оборудование uplink (рис. 3б):

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, p_3\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2\};$$

$$E^{AS} = \{e_1\} = \{\{\{p_2\}, \{p_1, p_3\}\}\};$$

– несколько точек присутствия stub подключены к нескольким точкам присутствия uplink. Резервируются каналы связи до uplink и оборудование обеих АС (рис. 3в):

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2\};$$

$$E^{AS} = \{e_1\} = \{\{\{p_2, p_3\}, \{p_1, p_4\}\}\}.$$

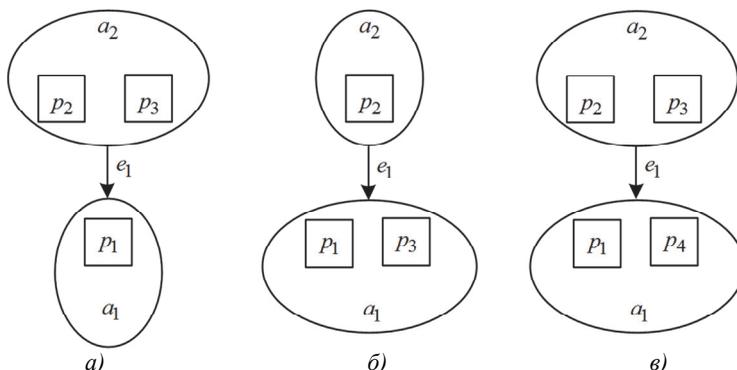


Рис. 3. Метаграф, описывающий подключение тупиковой АС к сети Интернет (вариант с несколькими РоР)

Подключение многоинтерфейсной АС к сети Интернет. Рассмотренный ранее вариант обеспечивает резервирование на уровне линий связи, однако не обеспечивает надежного соединения АС с глобальной сетью в том случае, если деградирует система междоменной маршрутизации в сети uplink. Для решения этой проблемы организуются альтернативные (резервные) подключения к другим вышестоящим uplink АС, и в этом случае АС назначения называется многоинтерфейсной (multihomed). На рисунке 4 изображена модель такого соединения для случая, когда multihomed АС имеет одну точку присутствия:

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, p_3\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2, a_3\};$$

$$E^{AS} = \{e_1, e_2\} = \{\{\{p_2\}, \{p_1\}\}, \{\{p_3\}, \{p_1\}\}\}.$$

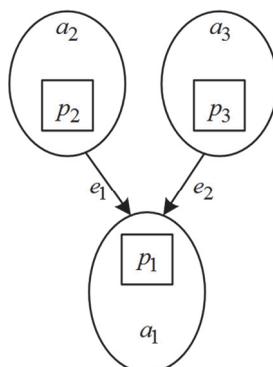


Рис. 4. Метаграф, описывающий подключение многоинтерфейсной АС к сети Интернет (вариант с одной РоР)

Если multihomed АС имеет несколько PoP, резервирование обеспечивается на физическом, канальном и сетевом уровнях. Вариант модели такого подключения представлен на рисунке 5:

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2, a_3, a_4\};$$

$$E^{AS} = \{e_1, e_2, e_3\} = \{\langle\{p_2\}, \{p_1, p_4\}\rangle, \langle\{p_3\}, \{p_1, p_4\}\rangle, \langle\{p_3, p_5\}, \{p_1, p_4\}\rangle\}.$$

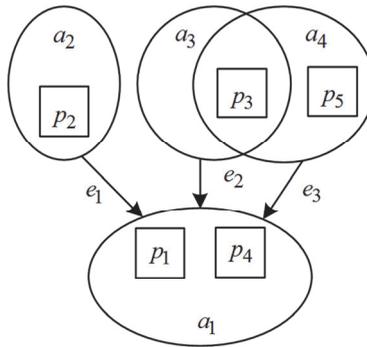


Рис. 5. Метаграф, описывающий подключение многоинтерфейсной АС к сети Интернет (вариант с несколькими PoP)

Модель multihomed АС с несколькими PoP характерна, в частности, для контент-провайдеров: они стремятся сократить задержки при передаче контента и быть «ближе» к клиентам. Чтобы сократить путь трафика от своих серверов до узлов назначения, они проводят, как правило, открытую политику пиринга: имеют BGP-подключения к большому количеству АС (чем больше – тем лучше). Оборудование контент-провайдеров размещается на крупных IXP и соединяется выделенными (собственными или арендованными) высокоскоростными каналами.

Альтернативный подход к сокращению времени передачи трафика клиентам заключается в том, что контент-провайдеры доверяют доставку трафика третьей стороне – CDN, которая имеет географически распределенную высокоскоростную сеть и точки присутствия на крупных IXP.

Оба подхода к оптимизации трафика имеют право на жизнь, поскольку в первом случае контент провайдер стремится приблизить клиентов к данным, а во втором случае – данные к клиентам. Вопрос о преимуществах того или иного решения пока остается открытым [30].

Подключение к сети Интернет транзитной АС. Любая транзитная (transit) АС способна передавать трафик, отправитель и получа-

тель которого расположены за ее пределами. Если транзитная АС является магистральным оператором связи, ее конкурентное преимущество заключается в географически распределенной внутренней сети и способности переносить трафик в масштабах страны, континента или всего мира. Вследствие этого подобные АС имеют более одной точки присутствия (рис. 6):

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\};$$

$$E^{AS} = \{e_1, e_2, e_3, e_4\} = \left\{ \left\{ \{p_2\}, \{p_1, p_6, p_7\} \right\}, \left\{ \{p_3\}, \{p_1, p_6, p_7\} \right\}, \right. \\ \left. \left\{ \{p_1, p_6, p_7\}, \{p_4\} \right\}, \left\{ \{p_1, p_6, p_7\}, \{p_5\} \right\} \right\}.$$

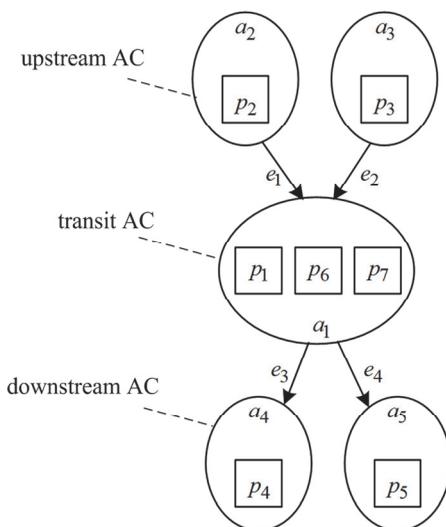


Рис. 6. Метаграф, описывающий подключение транзитной АС к сети Интернет

Существуют транзитные АС, конкурентное преимущество которых определяется не географическим масштабом их внутренней сети, а предоставляемыми услугами. К таким услугам относится, в частности, защита информационных ресурсов от DDoS-атак. Такие АС могут иметь всего одну точку присутствия: на ней трафик из глобальной сети попадает в транзитную АС, фильтруется и на ней же передается в АС назначения.

Изучение структурных свойств глобальной сети на основе метаграфовых моделей требует введения следующих понятий [28]:

Определение 4. Простой путь $h = (x, y)$ из элемента x в элемент y это такая последовательность ребер $\langle e_1, e_2, \dots, e_n \rangle$, для которой

$x \in \text{in-вершине}(e_1)$, $y \in \text{out-вершине}(e_n)$ и для всех $e_i, i = 1, \dots, n-1$, $\text{out-вершина}(e_i) \cap \text{in-вершина}(e_{i+1}) \neq \emptyset$.

Определение 5. В метаграфе $S = \langle X, E \rangle$ *метапуть* $M = \langle B, C \rangle$ из источника $B \subset X$ к цели $C \subset X$ – это множество ребер $E' \subseteq E$, такое, что:

– каждое ребро $e' \in E'$ входит в простой путь из какого-либо элемента $x \in B$ в какой-либо элемент $y \in C$;

– $[\bigcup_{e'} V_{e'} \setminus \bigcup_{e'} W_{e'}] \subseteq B$;

– $C \subseteq \bigcup_{e'} W_{e'}$.

Между простым путем и метапутем существуют следующие различия:

– во-первых, метапуть это множество ребер, а не их последовательность;

– во-вторых, источник и цель метапути это подмножества, а не элементы порождающего множества;

– в-третьих, понятие *совхода* неприменимо для метапути, поскольку множество источников включает все элементы порождающего множества.

В контексте моделирования глобальной сети простой путь – это последовательность АС, через которые передается трафик от РоР отправителя до РоР получателя. Простой путь в метаграфе пригоден для описания фактических маршрутов передачи трафика: пакеты (независимо от наличия альтернативных маршрутов и применяемых правил балансировки трафика) проходят такую последовательность точек присутствия операторов связи, в которой две соседние точки присутствия либо принадлежат одной АС, либо принадлежат таким двум АС, которые соединены ребром в АС-графе.

В свою очередь, метапуть описывает множество альтернативных междоменных маршрутов передачи трафика, возникающее в результате работы протокола BGP. Метапуть пригоден для описания потенциальных маршрутов передачи трафика, поскольку из АС источника трафика до АС получателя трафика в общем случае существует более одного маршрута.

Анализ АС-графа требует введения еще нескольких определений [28].

Определение 6. Даны два множества элементов B и C в метаграфе $S = \langle X, E \rangle$, такие что существует метапуть $M = \langle B, C \rangle$, при этом множество ребер E' является *разрезающим множеством* между

B и C , если не существует метапути из B в C в метаграфе $S' = \langle X, E \setminus E' \rangle$; кроме того, не существует подмножества E' , которое также является разрезающим множеством между B и C .

Определение 7. Разрезающее множество единичной мощности между двумя множествами элементов B и C является *мостом* между ними.

Разрезающие множества и мосты позволяют выявить «узкие» места в различных системах. При анализе структуры сети Интернет это относится прежде всего к связности АС друг с другом для обеспечения попарной взаимной доступности всех узлов. Несмотря на то, что система междоменной маршрутизации децентрализована и ее работоспособность нарушить не просто, известны инциденты, вследствие которых некоторые ресурсы становились недоступными для большей части глобальной сети [31]. Аналогично сегмент сети Интернет в масштабе страны (например, Рунет – российский сегмент сети Интернет) может быть разделен на несколько множеств АС, не имеющих связи между собой [32].

5. Способ построения метаграфа, описывающего структуру сети Интернет. ССМИ RIPE RIS [13] предоставляет доступ к маршрутным таблицам маршрутизаторов в формате Multi-Threaded Routing Toolkit (MRT) [33], для парсинга которых применялся Python-модуль `mrtparse` [17]. БД PeeringDB [21] доступна в виде локальной копии, доступ к которой осуществлялся посредством Python-модуля `peeringdb` [34]. Метаграф формируется в результате выполнения следующих последовательности шагов:

1) сформировать порождающее множество P^{PoP} на основе множества точек присутствия (таблица `peeringdb_facility` БД PeeringDB);

2) сформировать из элементов множества P^{PoP} множества *in*- и *out*-вершин A^{AS} на основе привязки точек присутствия и АС (таблицы `peeringdb_network` и `peeringdb_network_facility`);

3) сформировать множество ребер метаграфа E^{AS} на основе результата парсинга MRT-файла. Отбираются только маршруты до АС из множества A^{pop_rus} . Из атрибута `AS_PATH` формируются элементы множества E^{AS} в соответствии со следующими правилами:

– атрибут `AS_PATH` анализируется слева направо в виде пар АС – левой a^{left} и правой a^{right} . Перед анализом первой пары специальная переменная a^{left*} равна 0;

– если $a^{left*} \neq 0$ и $a^{left} \in A^{AS}$, то добавляется ребро $\langle a^{left*}, a^{left} \rangle$

и значение переменной a^{left*} устанавливается 0;

- если $a^{left*} \neq 0$ и $a^{right} \in A^{AS}$, то добавляется ребро $\langle a^{left*}, a^{right} \rangle$ и значение переменной a^{left*} устанавливается 0;
 - если $a^{left} \in A^{AS}$ и $a^{right} \in A^{AS}$, то добавляется ребро $\langle a^{left}, a^{right} \rangle$;
 - если $a^{left} \in A^{AS}$, а $a^{right} \notin A^{AS}$, то $a^{left*} = a^{left}$ для добавления ребра метаграфа при анализе последующих пар АС;
- 4) сформировать метаграф $S^{AS_PoP} = \langle P^{PoP}, A^{AS} \rangle$.

Процесс создания метаграфа из исходных данных проиллюстрирован на рисунке 7.

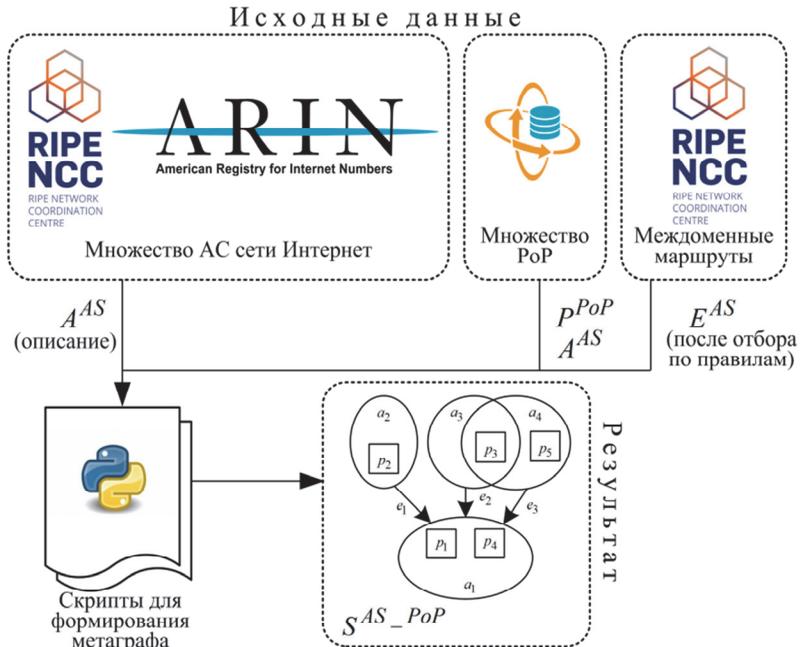


Рис. 7. Процесс создания метаграфа

С учетом масштаба модели сети S^{AS_PoP} ее анализ вручную не представляется возможным. Результат поиска автоматизированных инструментов для анализа метаграфов и средств их отображения представлен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ инструментов для работы с метаграфами

Название	Тип	Возможности
MGtoolkit [35]	Модуль для языка программирования Python	Создание и модификация метаграфа, анализ связности, трансформация метаграфа, назначение атрибутов элементам метаграфа (т.н. conditional metagraphs)
https://charmwiz.com	Онлайн конструктор	Создание метаграфов в графическом конструкторе, создание случайных метаграфов

Выбор инструментов невелик и для решения поставленной задачи целесообразно использовать модуль MGtoolkit для Python. Используемая в MGtoolkit модель данных (рис. 8) обеспечивает эффективный доступ к элементам метаграфа и имеет развитые средства его анализа: функцию поиска разрезающего подмножества между заданными вершинами `get_minimal_cutset(source, target)`, функцию получения всех метапутей между двумя вершинами `get_all_metapaths_from(source, target)` и другие [36].

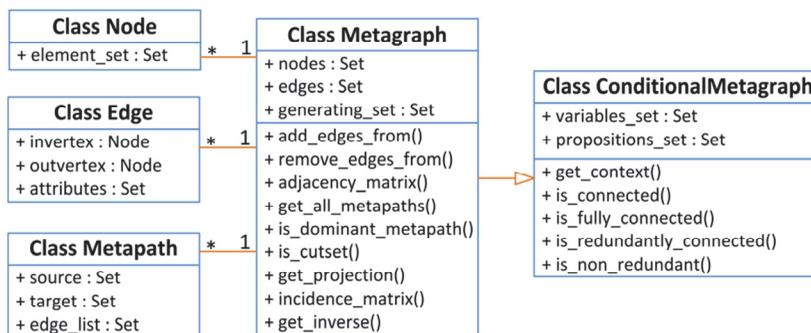


Рис. 8. Модель данных для описания метаграфа

Ограничения, налагаемые исходными данными (по состоянию на июнь 2020 года):

- множество точек присутствия АС ограничено техническими площадками, описанными в общедоступной базе данных (БД) PeeringDB, всего описано более 3700 PoP;

- множество АС описано в БД интернет-регистраторов RIPE, ARIN, LACNIC, APNIC и AfriNIC. Всего более 110000 АС [37];

– множество ребер AC-графа ограничено данными, получаемыми из ССМИ RIPv6 с точки обмена трафиком MSK-IX [38]. При этом в AC-граф попадают только те ребра, обе вершины которых имеют хотя бы одну известную PoP. В БД PeeringDB привязку к точкам присутствия имеют 19159 AC, что составляет около 17%. В феврале 2019 года такую привязку имели 14% AC.

6. Проблемно-ориентированное использование предложенной модели. С помощью предложенной модели структуры глобальной сети в виде метаграфа предлагается решать следующие ориентированные на практику задачи:

– поиск множества AC сети Интернет, разрыв связности с которыми может привести к изоляции национального сегмента сети от глобальной сети;

– поиск множества AC сети Интернет, разрыв связности с которыми может привести к разделению национального сегмента сети на части, обмен трафиком между которыми возможен только через зарубежные точки присутствия.

Решение указанных задач является направлением дальнейших исследований, однако их формальная постановка представлена ниже.

6.1. Изоляция национального сегмента глобальной сети (на примере России).

Дано:

– множество AC A^{pop_rus} , которые имеют точки присутствия только на территории России. С учетом (5)-(8) имеем:

$$\begin{aligned} \text{get_pop_of_AS}(a) &= P^a, \quad \forall a \in A^{pop_rus}, \\ \text{is_pop_in_country}(p, "RU") &= 1, \quad \forall p \in P^a; \end{aligned}$$

– множество AC A^{pop_global} , которые имеют точки присутствия как на территории России, так и за ее пределами. Каждая AC $a \in A^{pop_global}$ обеспечивает связность части Рунета с глобальной сетью, при этом не накладывается ограничений на национальную принадлежность точек присутствия AC из A^{pop_global} :

$$\begin{aligned} \text{get_pop_of_AS}(a) &= P^a, \quad \forall a \in A^{pop_global}, \\ \exists p \in P^a : \text{is_pop_in_country}(p, "RU") &= 1, \\ \exists p \in P^a : \text{is_pop_in_country}(p, "RU") &= 0. \end{aligned}$$

Найти: подмножество $A^{pop_rus} \cup A^{pop_global}$ минимальной мощности, удаление которых из AC-графа приведет к отделению рос-

сийского сегмента сети Интернет от глобальной сети. Частным случаем этой задачи является отделение части российского сегмента.

Решение может быть получено последовательным удалением *некоторых* АС из АС-графа и проверкой на связность множеств A^{pop_rus} и A^{pop_global} после каждой процедуры удаления. Эта процедура позволит найти разрезающее множество между A^{pop_rus} и A^{pop_global} поскольку данные множества являются множествами *in-вершин* (*out-вершин*) согласно (3). Множество удаленных АС будет разрезающим множеством согласно определению 6.

Слово *некоторых* подразумевает различные способы выбора АС, которые следует удалить: случайный выбор, удаление АС с максимальной связностью и тому подобное.

6.2. Разделение национального сегмента глобальной сети (на примере России).

Дано:

– множество АС A^{pop_rus} , которые имеют точки присутствия только на территории России (аналогично задаче 5.1).

– множество АС A^{pop_global} , которые имеют точки присутствия как на территории России, так и за ее пределами (аналогично задаче 5.1).

Найти: подмножество $A^{pop_rus} \cup A^{pop_global}$ минимальной мощности, удаление которых приведет к разделению АС-графа российского сегмента сети Интернет на два подмножества АС, между которыми не будет метапутей, и обмен трафиком будет возможен только через АС из множества A^{pop_global} .

Решение может быть получено последовательным удалением *некоторых* АС из АС-графа и проверкой на связность множества A^{pop_rus} после каждой процедуры удаления. Эта процедура позволит найти те АС, связность которых с остальной частью Рунета критически важна.

Слово *некоторых* подразумевает различные способы выбора АС, которые следует удалить: случайный выбор АС из Рунета, удаление АС с максимальной связностью в Рунете и тому подобное.

7. Заключение. Декомпозиция структуры сети Интернет на уровне широко используется в задачах оценивания устойчивости сети и безопасности передаваемых в ней данных. Решение таких задач требует комплексного подхода: сбора данных о сетевых сущностях, создания математических моделей анализа взаимосвязей элементов системы на двух и более уровнях, разработки программных средств и их внедрения в деятельность интернет-провайдеров и регулирующих органов.

Предложенная модель структуры глобальной сети может быть использована в существующих системах обнаружения отказов на уровне АС или точек присутствия операторов связи [6, 39] при исследовании надежности связи заданного множества АС с глобальной сетью [40] и при обеспечении связности с национальным сегментом сети Интернет тех сервисов, которые не должны передавать трафик через зарубежные точки присутствия.

Направлениями дальнейших исследований являются:

- программная реализация инструментов анализа структуры глобальной сети на основе предложенной модели;
- создание моделей деструктивных воздействий на AS Level (удаление вершин и ребер из АС-графа) и на PoP Level (удаление элементов порождающего множества);
- оценивание структурных феноменов российского сегмента сети Интернет с целью поиска «узких мест», деструктивные воздействия на которые могут привести к частичной или полной недоступности сетевых сервисов для абонентов.

Решение этих задач позволит отнести ряд интернет-провайдеров и точки их присутствия к объектам критической информационной инфраструктуры и сформировать технически обоснованные требования к их связности.

Литература

1. *Huffaker B.* Autonomous Systems (AS) Introduction and Topology. URL: www.caida.org/publications/presentations/2016/as_intro_topology_wind/as_intro_topology_wind.pdf (дата обращения: 26.03.2019).
2. *Anwar R. et al.* Investigating Interdomain Routing Policies in the Wild. URL: <http://conferences2.sigcomm.org/imc/2015/papers/p71.pdf> (дата обращения: 16.08.2019).
3. *McDonald A. et al.* 403 Forbidden: A Global View of CDN Geoblocking // 2018 Internet Measurement Conference. URL: <http://delivery.acm.org/10.1145/3280000/3278552/p218-McDonald.pdf> (дата обращения: 26.06.2019).
4. *Filer M.* Elastic Optical Networking in the Microsoft Cloud // Optical Society of America. 2016. vol. 8. no. 7. URL: https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/07/JOCN_Microsoft_EONs_2016_published.pdf (дата обращения: 15.08.2019).
5. *Luckie M. et al.* bdrmap: Inference of Borders Between IP Networks // 2016 Internet Measurement Conference. URL: <https://www.caida.org/publications/papers/2016/bdrmap/bdrmap.pdf> (дата обращения: 26.03.2019).
6. *Giotsas V. et al.* Detecting Peering Infrastructure Outages in the Wild // Proceedings of SIGCOMM '17. URL: <https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/123508/1/SIGCOMM2017.pdf> (дата обращения: 21.01.2019).

7. *Magharei N., Rejaie R., Rasti A.* Eyeball ASes: From Geography to Connectivity // 2011 Internet Measurement Conference. URL: conferences.sigcomm.org/imc/2010/papers/p192.pdf (дата обращения: 21.01.2019).
8. *Feldman D., Shavitt Y., Zilberman N.* A Structural Approach for PoP Geo-Location // 2010 INFOCOM IEEE Conference on Computer Communications Workshops. 2010. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Structural-Approach-for-PoP-Geo-Location-Feldman-Shavitt/030e9d38121227b89523e063f241e52b472d5909> (дата обращения: 26.03.2019).
9. *Smaragdakis G., Huffaker B., Giotsas V.* Mapping Peering Interconnections to a Facility // Proceedings of the 11th ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. 2015. URL: caida.org/publications/papers/2015/mapping_peering_interconnections/mapping_peering_interconnections.pdf (дата обращения: 26.03.2019).
10. *Shavitt Y., Zilberman N.* Improving IP geolocation by crawling the internet PoP level graph // 2013 IFIP Networking Conference. 2013 URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Improving-IP-geolocation-by-crawling-the-internet-Shavitt-Zilberman/0277fca9f0e80438ac298cd78ffb0f883781f249> (дата обращения: 26.03.2019).
11. 2018 Global Internet Phenomena Report. URL: <https://www.sandvine.com/2018-internet-phenomena-report> (дата обращения: 26.03.2019).
12. *Робачевский А.М.* Интернет изнутри // М.: Альпина Пабlisher. 2015. 223 с.
13. Официальный сайт Routing Information Service. URL: www.ripe.net/projects/ris/docs/index.html (дата обращения: 26.03.2019).
14. Официальный сайт University of Oregon Route Views Project. URL: www.routeviews.org (дата обращения: 26.03.2019).
15. Официальный сайт Packet Clearing House. URL: www.pch.net/home/index.php (дата обращения: 26.03.2019).
16. *Ardelean D.* libBGPDump. URL: <https://bitbucket.org/ripence/bgpdump/wiki/Home> (дата обращения: 06.04.2019).
17. *Yamauchi Y., Kiso N.I.T.* MRT format data parser. URL: <https://github.com/t2mune/mrtparse> (дата обращения: 06.04.2019).
18. *Иванов М.В., Филлимонов П.А.* Модель сети Интернет на уровне автономных систем в виде безмасштабного графа // Телекоммуникации: Наука и технология. 2016. № 11. С. 22–26.
19. Официальный сайт проекта об IT linkmeup. URL: <http://linkmeup.ru/blog/65.html> (дата обращения: 26.03.2019).
20. *Roughan M., Willinger W.* Internet Topology Research Redux // Recent Advances in Networking. 2013. URL: sigcomm.org/education/ebook/SIGCOMM-Book2013v1_chapter1.pdf (дата обращения: 26.09.2018).
21. Официальный сайт проекта PeeringDB. URL: peeringdb.com (дата обращения: 26.03.2019).
22. *Zilberman N.* The Internet PoP Level Graph : PhD thesis / Tel-Aviv University, 2013. URL: cl.cam.ac.uk/~nz247/publications/zilber-man_PhDThesis.pdf (дата обращения: 06.01.2020).
23. Официальный сайт MSK-IX. Города и адреса узлов. URL: <https://kb.msk-ix.ru/ix/locations> (дата обращения: 12.08.2019).
24. *Gaur D., Shastri A., Biswas R.* Introducing 'Meta-Network': A New Concept in Network Technology. URL: https://www.researchgate.net/publication/263638974_Introducing_'Meta-Network'_A_New_Concept_in_Network_Technology (дата обращения: 26.03.2019).
25. *Nykl J., Hrnčir J., Jakob M.* Achieving Full Plan Multimodality by Integrating Multiple Incomplete Journey Planners // IEEE 18th International Conference on Intelligent

- Transportation Systems (ITSC). 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/283495853_Achieving_Full_Plan_Multimodality_by_Integrating_Multiple_Incomplete_Journey_Planners (дата обращения: 22.07.2019).
26. *Papadopoulos S., Kompatsiaris Y., Vakali A., Spyridonos P.* Community detection in Social Media // *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/233790771_Community_detection_in_Social_Media (дата обращения: 22.07.2019).
27. *Fang Y. et al.* Semantic Proximity Search on Graphs with Metagraph-based Learning // *IEEE 32nd International Conference on Data Engineering (ICDE)*. 2016. URL: https://ink.library.smu.edu.sg/cgi/viewcontent.cgi?article=5063&context=sis_research (дата обращения: 26.03.2019).
28. *Basu A., Blanning R.W.* Metagraphs and their applications // *Springer Science & Business Media*. 2007. 172 с.
29. *Dovrolis A., Dhamdhere C.* Twelve Years in the Evolution of the Internet Ecosystem // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2011. vol. 19. no. 5. pp. 1420–1433. URL: caida.org/publications/papers/2011/twelve_years_evolution/twelve_years_evolution.pdf (дата обращения: 26.03.2019).
30. *Huston G.* The Death of Transit? URL: <http://www.potaroo.net/ispcol/2016-10/xtransit.html> (дата обращения: 26.11.2018).
31. *Дробышев Е.* деПИР во имя статус-кво CDN платежей: Comcast против Level3. URL: <https://nag.ru/articles/article/19954/depir-vo-imya-status-kvo-cdn-platejey-comcast-protiv-level3.html> (дата обращения: 26.03.2018).
32. *Кунчатов А.* Магистральный Интернет транзит России 2009, часть I. URL: <https://nag.ru/articles/blogs/17525/magistralnyiy-internet-tranzit-rossii-2009-chast-i.html> (дата обращения: 26.10.2017).
33. *Blunk L., Karir M., Labovitz C.* Multi-Threaded Routing Toolkit (MRT) Routing Information Export Format // *Internet Engineering Task Force (IETF)*. 2011. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6396> (дата обращения: 26.03.2019).
34. Официальный сайт исходных кодов проекта PeeringDB. URL: <https://github.com/peeringdb/peeringdb> (дата обращения: 06.06.2020).
35. Официальный сайт проекта mgtoolkit. URL: <https://github.com/dinesharanathunga/mgtoolkit> (дата обращения: 26.03.2019).
36. *Ranathunga D., Nguyen H., Roughan M.* MGtoolkit: A python package for implementing metagraphs // *SoftwareX*. 2017. vol. 6. pp. 91–93. URL: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.04.001> (дата обращения: 26.11.2019).
37. *Huston G.* The 32-bit AS Number Report. URL: www.potaroo.net/tools/asn32 (дата обращения: 06.06.2020).
38. Официальный сайт Routing Information Service. RIS Raw Data. URL: data.ris.ripe.net/rrc13 (дата обращения: 06.06.2020).
39. *Richter P et ap.* Advancing the Art of Internet Edge Outage Detection // *In 2018 Internet Measurement Conference*. URL: <http://delivery.acm.org/10.1145/3280000/3278563/p350-Richter.pdf> (дата обращения: 26.11.2019).
40. Федеральный закон от 01.05.2019 № 90-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О связи» и Федеральный закон «Об информации, информационных технологиях и о защите информации». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201905010025> (дата обращения: 20.05.2020).

Иванов Максим Владимирович — канд. техн. наук, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (Академия ФСО России). Область научных интересов: представление и обработка данных в виде графов, методы описания иерархических сетей, применение методов дискретной оптимизации, технологии разработки распределенных программных комплексов. Число научных публикаций — 21. maximivanov@mail.ru; ул. Приборостроительная, 35, 302015, Орел, Россия; р.т.: +7 (4862) 54-96-15.

Калашиков Иван Витальевич — сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (Академия ФСО России). Область научных интересов: применение методов математического моделирования для исследования телекоммуникационных сетей, технологии разработки web-приложений. Число научных публикаций — 0. pro100vaness@gmail.com; ул. Приборостроительная, 35, 302015, Орёл, Россия; р.т.: +7 (4862) 54-96-15.

Нуруллаев Мехран Мирзожонович — сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (Академия ФСО России). Область научных интересов: применение методов математического моделирования для исследования телекоммуникационных сетей, технологии разработки программных комплексов с СУБД. Число научных публикаций — 1. nur-mehran@mail.ru; ул. Приборостроительная, 35, 302015, Орёл, Россия; р.т.: +7 (4862) 54-96-15.

M. IVANOV, I. KALASHNIKOV, M. NURULLAEV
**STUDY OF INTERNET STRUCTURE PROPERTIES BASED ON
METAGRAPH MODELS**

Ivanov M., Kalashnikov I., Nurullaev M. Study of Internet Structure Properties based on Metagraph Models.

Abstract. Studying the Internet its structure is usually divided into levels: Autonomous Systems Level (AS), Point of Presence Level (PoP), Router Level, etc. The global network can be represented on each of them as a graph based on the initial data obtained from open sources. Consideration of a network within the framework of a separate level facilitates analysis, but does not allow to systematically assess its structural properties when providing the connectivity between several segments of the network related, particularly, to the objects of critical information infrastructure. To overcome this contradiction, a mathematical model of the global network in the form of a metagraph was developed at the interface between AS-level and PoP-level that takes into account the characteristics of each level and allows to find bottlenecks both in the interdomain routing system and in the topology of internal networks of Internet providers.

Based on the proposed model some structural phenomena of the global network are described: stub, multihomed and transit autonomous systems, content providers. Taking into account available data from open sources about Internet structure, a method for constructing a metagraph is proposed. A comparative analysis of tools that automate the process of analyzing a network model is carried out. The practice-oriented problems of finding a cutting subset in a metagraph were set. Certain areas of further research are software implementation of the models using module MGtoolkit in Python and the assessment of structural phenomena of Russian segments of the Internet.

Keywords: Internet, Autonomous System, Point of Presence, Routing, BGP, Metagraph, Cutting Subset, Python, MGtoolkit, Objects of Critical Information Infrastructure.

Ivanov Maxim — Ph.D., Researcher, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: graph models, hierarchical networks, discrete optimization, distributed software. The number of publications — 21. maximivanov@mail.ru; 35, Priborostroitel'naya str., 302015, Orel, Russia; office phone: +7 (4862) 54-96-15.

Kalashnikov Ivan — Researcher, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: mathematic models of the computer networks, web applications developing. The number of publications — 0. pro100vaness@gmail.com; 35, Priborostroitel'naya str., 302015, Orel, Russia; office phone: +7 (4862) 54-96-15.

Nurullaev Mekhran — Researcher, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: mathematic models of the computer networks, big-data applications developing. The number of publications — 1. nur-mehran@mail.ru; 35, Priborostroitel'naya str., 302015, Orel, Russia; office phone: +7 (4862) 54-96-15.

References

1. Huffaker B. Autonomous Systems (AS) Introduction and Topology. Available at: www.caida.org/publications/presentations/2016/as_intro_topology_wind/as_intro_topology_wind.pdf (accessed: 26.03.2019).
2. Anwar R. et al. Investigating Interdomain Routing Policies in the Wild. Available at: <http://conferences2.sigcomm.org/imc/2015/papers/p71.pdf> (accessed: 16.08.2019).

3. McDonald A. et al. 403 Forbidden: A Global View of CDN Geoblocking. 2018 Internet Measurement Conference. Available at: <http://delivery.acm.org/10.1145/3280000/3278552/p218-McDonald.pdf> (accessed: 26.06.2019).
4. Filer M. et al. Elastic Optical Networking in the Microsoft Cloud. Optical Society of America. 2016. vol. 8. no. 7. Available at: https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/07/JOCN_Microsoft_EONs_2016_published.pdf (accessed: 15.08.2019).
5. Luckie M. et al. bdrmap: Inference of Borders Between IP Networks. 2016 Internet Measurement Conference. Available at: <https://www.caida.org/publications/papers/2016/bdrmap/bdrmap.pdf> (accessed: 26.03.2019).
6. Giotsas V., Dietzel P., Smaragdakis G., Feldmann A., Berger A., Aben E. Detecting Peering Infrastructure Outages in the Wild. Proceedings of SIGCOMM '17. 2017. Available at: <https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/123508/1/SIGCOMM2017.pdf> (accessed: 21.01.2019).
7. Magharei N., Rejaie R., Rasti A. Eyeball ASes: From Geography to Connectivity. 2011 Internet Measurement Conference (IMC '11, 2011). Available at: conferences.sigcomm.org/imc/2010/papers/p192.pdf (accessed: 21.01.2019).
8. Feldman D., Shavitt Y., Zilberman N. A Structural Approach for PoP Geo-Location. 2010 INFOCOM IEEE Conference on Computer Communications Workshops. 2010. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Structural-Approach-for-PoP-Geo-Location-Feldman-Shavitt/030c9d38121227b89523e063f241e52b472d5909> (accessed: 26.03.2019).
9. Smaragdakis G., Huffaker B., Giotsas V. Mapping Peering Interconnections to a Facility. Proceedings of the 11th ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. 2015. Available at: caida.org/publications/papers/2015/mapping_peering_interconnections/mapping_peering_interconnections.pdf (accessed: 26.03.2019).
10. Shavitt Y., Zilberman N. Improving IP geolocation by crawling the internet PoP level graph. 2013 IFIP Networking Conference. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Improving-IP-geolocation-by-crawling-the-internet-Shavitt-Zilberman/0277fca9f0e80438ac298cd78ff0f883781f249> (accessed: 26.03.2019).
11. 2018 Global Internet Phenomena Report. Available at: <https://www.sandvine.com/2018-internet-phenomena-report> (accessed: 26.03.2019).
12. Robachevskij A.M. *Internet iznutri* [Internet from inside]. M.: Alpina Publisher. 2015. 223 p. (In Russ.).
13. Official web site Routing Information Service. Available at: www.ripe.net/projects/ris/docs/index.html (accessed: 26.03.2019).
14. Official web site University of Oregon Route Views Project. Available at: www.routeviews.org (accessed: 26.03.2019).
15. Official web site Packet Clearing House. Available at: www.pch.net/home/index.php (accessed: 26.03.2019).
16. Ardelean D. libBGPDump. Available at: <https://bitbucket.org/ripence/bgpdump/wiki/Home> (accessed: 06.04.2019).
17. Yamauchi Y., Kiso N.I.T. MRT format data parser. Available at: <https://github.com/t2mune/mrtparse> (accessed: 06.04.2019).
18. Ivanov M.V., Filimonov P.A. [Model of the Internet at the Autonomous systems level as scale-free graph]. *Telekommunikacii: Nauka i tehnologija – Telecommunications: The Science and the Technology*. 2016. vol. 11. pp. 22–26. (In Russ.).

19. Oficial'nyj sajt proekta ob IT linkmeup [Official site of the project about IT linkmeup]. Available at: <http://linkmeup.ru/blog/65.html> (accessed: 26.03.2019). (In Russ.).
20. Roughan M., Willinger W. Internet Topology Research Redux. *Recent Advances in Networking*. 2013. Available at: sigcomm.org/education/ebook/SIGCOMM-Book2013v1_chapter1.pdf (accessed: 26.09.2018).
21. Oficial'nyj sajt proekta PeeringDB. [Official site of the PeeringDB project]. Available at: peeringdb.com (accessed: 26.03.2019). (In Russ.).
22. Zilberman N. The Internet PoP Level Graph : PhD thesis. Tel-Aviv University, 2013. Available at: cl.cam.ac.uk/~nz247/publications/zilber-man_PhDThesis.pdf (accessed: 06.01.2020).
23. Oficial'nyj sajt MSK-IX. Goroda i adresa uzlov. [Official site of the MSK-IX. Cities and addresses of hosts]. Available at: <https://kb.msk-ix.ru/ix/locations> (accessed: 12.08.2019). (In Russ.).
24. Gaur D., Shastri A., Biswas R. Introducing 'Meta-Network': A New Concept in Network Technology. Available at: https://www.researchgate.net/publication/263638974_Introducing_'Meta-Network'_A_New_Concept_in_Network_Technology (accessed: 26.03.2019).
25. Nykl J., Hrnčíř J., Jakob M. Achieving Full Plan Multimodality by Integrating Multiple Incomplete Journey Planners. IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 2015. Available at: https://www.researchgate.net/publication/283495853_Achieving_Full_Plan_Multimodality_by_Integrating_Multiple_Incomplete_Journey_Planners (accessed: 22.07.2019).
26. Papadopoulos S., Kompatsiaris Y., Vakali A., Spyridonos P. Community detection in Social Media. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2012. Available at: https://www.researchgate.net/publication/233790771_Community_detection_in_Social_Media (accessed: 22.07.2019).
27. Fang Y. et al. Semantic Proximity Search on Graphs with Metagraph-based Learning. IEEE 32nd International Conference on Data Engineering (ICDE). 2016. Available at: https://ink.library.smu.edu.sg/cgi/viewcontent.cgi?article=5063&context=sis_research (accessed: 26.03.2019).
28. Basu A., Blanning R.W. Metagraphs and their applications. Springer Science & Business Media. 2007. 172 p.
29. Dovrolis A., Dhamdhere P. Twelve Years in the Evolution of the Internet Ecosystem. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2011. vol. 19. no. 5. pp. 1420–1433. Available at: caida.org/publications/papers/2011/twelve_years_evolution/twelve_years_evolution.pdf (accessed: 26.03.2019).
30. Huston G. The Death of Transit? Available at: <http://www.potaroo.net/ispcol/2016-10/xtransit.html> (accessed: 26.11.2018).
31. Drobyshev E. Drobyshev E. dePIR vo imja status-kvo CDN platezhej: Comcast protiv Level3. [dePeer to maintain the current status quo of CDN payments: Comcast against Level3.] Available at: <https://nag.ru/articles/article/19954/depir-vo-imya-status-kvo-cdn-platejey-comcast-protiv-level3.html> (accessed: 26.03.2018). (In Russ.).
32. Kipchatov A. Magistral'nyj Internet tranzit Rossii. [Internet backbone transit of Russian]. 2009. Available at: <https://nag.ru/articles/blogs/17525/magistralnyiy-internet-tranzit-rossii-2009-chast-i.html> (accessed: 26.10.2017). (In Russ.).
33. Blunk L., Karir M., Labovitz P. Multi-Threaded Routing Toolkit (MRT) Routing Information Export Format. Internet Engineering Task Force (IETF). 2011. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc6396> (accessed: 26.03.2019).
34. Oficial'nyj sajt ishodnyh kodov proekta. [Official site of the source codes of the PeeringDB project.]. Available at: <https://github.com/peeringdb/peeringdb> (accessed: 06.06.2020). (In Russ.).

35. Official'nyj sajt proekta mgtoolkit [Official site of the mgtoolkit project]. Available at: <https://github.com/dinesharanathunga/mgtoolkit> (accessed: 26.03.2019). (In Russ.).
36. Ranathunga D., Nguyen H., Roughan M. MGtoolkit: A python package for implementing metagraphs. SoftwareX. 2017. vol. 6. pp. 91–93. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.04.001> (accessed: 26.11.2019).
37. Huston G. The 32-bit AS Number Report. Available at: www.potaroo.net/tools/asn32 (accessed: 06.06.2020).
38. Official web site Routing Information Service. RIS Raw Data. Available at: data.ris.ripe.net/rrc13 (accessed: 06.06.2020).
39. Richter P. et al. Advancing the Art of Internet Edge Outage Detection. 2018 Internet Measurement Conference (IMC '18, Boston, MA, USA. ACM, New York, NY, USA. 31, October - 2, November, 2018). Available at: <http://delivery.acm.org/10.1145/3280000/3278563/p350-Richter.pdf> (accessed: 26.11.2018).
40. Federal law No. 90 at 01.05.2019. [About amendments to the Federal law "About communications" and the Federal law "About information, information technologies and information protection"]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201905010025> (accessed: 20.05.2020). (In Russ.).