

УДК: [332.1:004](98)(045)

DOI: 10.37482/issn2221-2698.2021.42.145

Исследования, разработки и образование: создание основы для центров данных в Арктике и на Севере *

© САУНАВААРА Юха, Ph.D., доцент

E-mail: juha.saunavaara@arc.hokudai.ac.jp

Центр арктических исследований Университета Хоккайдо и Глобальная станция арктических исследований, Глобальный институт совместных исследований и образования, Университет Хоккайдо, Саппоро, Япония

© ЛАЙНЕ Антти, Ph.D., магистр

E-mail: antti.laine@ctse.fi;

Университет Або Академи; Энтег, Котка, Финляндия

Аннотация. Индустрия глобальных центров обработки данных — это огромный и быстрорастущий сектор. Этот рост привёл к развитию крупных кластеров центров обработки данных в различных северных регионах. Кроме того, стремление привлечь новые инвестиции в центры обработки данных было включено в планы и стратегии регионального развития в различных частях циркумполярного севера. Хотя директивные органы, как представляется, возлагают большие надежды, они и широкая общественность зачастую мало знают об отрасли, потребляющей огромное количество электроэнергии и играющей огромную роль в процессе цифровизации, который переживает мир. В настоящей статье предпринимается попытка повысить осведомлённость, уровень знаний и понимания этих вопросов среди всех заинтересованных сторон путём ознакомления с исследованиями и разработками, связанными с центрами обработки данных и образовательной деятельностью в Арктике и на Севере, а также исследованиями, касающимися развития отрасли центров обработки данных в холодной, северной среде. В итоге часто утверждается, что эти особые условия благоприятствуют строительству экологически чистых и устойчивых центров обработки данных.

Ключевые слова: центр обработки данных, коммуникационная инфраструктура, информационные технологии, Арктика, Север.

Research, Development, and Education: Laying Foundations for Arctic and Northern Data Centers

© Juha SAUNAVAARA, Ph.D., assistant professor

E-mail: juha.saunavaara@arc.hokudai.ac.jp

Hokkaido University Arctic Research Centre and the Global Station for Arctic Research, Global Institution for Collaborative Research and Education, Hokkaido University, Sapporo, Japan

© Antti LAINE, MA, Ph.D.

E-mail: antti.laine@ctse.fi;

Åbo Akademi University; CTS Enteg, Kotka, Finland

Abstract. The global data center industry is a huge and rapidly growing sector. This growth has resulted in the development of significant data center clusters in various northern regions. Furthermore, the desire to attract new data center investments has been incorporated into regional development plans and strategies in different parts of the Circumpolar North. Although the policy-makers seem to have great expectations, they and the general public often know little about the industry, which consumes huge amounts of electric-

* Для цитирования: Саунаваара Ю., Лайне А. Исследования, разработки и образование: создание основы для центров данных в Арктике и на Севере // Арктика и Север. 2021. № 42. С. 145–169. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2021.42.145

For citation: Saunavaara Ju., Laine A. Research, Development, and Education: Laying Foundations for Arctic and Northern Data Centers. *Arktika i Sever* [Arctic and North], 2021, no. 42, pp. 145–169. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2021.42.145

ity and plays an immense role in the digitalization process that the world is experiencing. This article attempts to increase awareness, knowledge, and understanding of these matters among all relevant stakeholders by introducing data center-related research and development activities and education in the Arctic and the North, as well as research concerning the development of the data center industry in the cold, northern environment. After all, it is often argued that these particular conditions offer advantageous circumstances for the construction of environmentally friendly and sustainable data centers.

Keywords: *data centers, communications infrastructure, information technology, Arctic, North.*

Введение

После того как Google открыл свой центр обработки данных в Хамине, Финляндия, в 2011 г., а Facebook основал свой центр обработки данных в Лүлео в 2013 г., региональные правительства в Северной Швеции признали необходимость создания скоординированной отраслевой стратегии центров обработки данных. В статье Т.В. Minde, работа над которой была завершена в 2014 г., подчёркивается, в частности, что Северная Швеция должна уделять особое внимание развитию научно-исследовательской и образовательной деятельности, связанной с центрами данных, и инвестировать в эту сферу. Сегодня регион Лүлео — Боден — Питео образует всемирно признанный кластер центров обработки данных, где находится центр обработки данных RISE ICE — один из ведущих исследовательских и инновационных центров в Европе. Таким образом, очевидно, что опыт, связанный с центрами обработки данных, был успешно добавлен к местным и региональным навыкам. Они рассматриваются как новый тип критически важной инфраструктуры, дополняющей традиционные горнодобывающие, гидроэнергетические, целлюлозно-бумажные и сталелитейные отрасли промышленности, которые расположены в регионе и пользуются значительной поддержкой со стороны исследований, разработок и обучения в местных университетах и научно-исследовательских институтах ¹.

Мощные региональные технические ноу-хау и наличие квалифицированного персонала также были выделены при позиционировании города Му-и-Рана на севере Норвегии в качестве подходящего места для размещения центров обработки данных ². Однако очевидно, что успех стран Северной Европы в привлечении инвестиций в центры обработки данных основан не только на человеческом капитале. Напротив, значительную роль сыграли избыточные запасы энергии и низкая цена на энергию (в большей мере, зелёную), а также холодный климат, стабильное общество, подходящая оптоволоконная связь, разумные цены на землю, низкие риски стихийных бедствий и низкая сейсмическая активность. Хотя с конца 2000-х и начала 2010-х гг. в различных арктических и северных регионах произошли большие изменения, а эти характеристики были впервые признаны активами, как сама отрасль, так и её присутствие на приполярном севере оставались малоизвестными широкой общественности. Более того, несмотря на наличие национальной и региональной политики центров об-

¹ Minde T.B. Strategi för att skapa en världsledande teknikregion i Norrbotten för klimatsmarta effektiva datacenter. Länsstyrelsen Norrbotten, 2014; Interview with Tor Björn Minde, Luleå, Sweden, 02.03.2018.

² Arctic Circle Data Center. URL: <https://arcticcircledc.com/> (дата обращения: 13.04.2020).

работки данных, можно утверждать, что быстрорастущая отрасль, потребляющая огромное количество электроэнергии, не получила достаточного внимания со стороны директивных органов и исследователей.

В настоящей статье преследуются две цели. Во-первых, делается попытка повысить уровень осведомлённости, знаний и понимания среди всех соответствующих национальных, региональных и местных заинтересованных сторон в отношении центров обработки данных, индустрии центров обработки данных и их роли в Арктике и на Севере. Центры обработки данных были описаны как сооружения, наиболее отчётливо олицетворяющие культуру XXI в., и они [1, Varnelis K.] вместе с глобальной оптоволоконной кабельной сетью составляют ядро так называемого Общества 5.0, где киберпространство и физическое пространство тесно интегрированы. Таким образом, вопросы, касающиеся центров обработки данных, могут больше не относиться только к сфере информационных и коммуникационных технологий (ИКТ), поскольку их можно рассматривать как новый тип базовой инфраструктуры, от которой зависит общество. Во-вторых, чтобы продемонстрировать сильные и слабые стороны региональных баз знаний и навыков, в настоящей работе представлены исследования и образовательная деятельность центров обработки данных, которые проводились в Арктике и на Севере, а также исследования, касающиеся прошлого, настоящего и будущего развития промышленности центров обработки данных в холодной северной среде.

Важность изучения местных и региональных сетей знаний и навыков можно проследить до обсуждения вопросов, касающихся тематических кластеров, регионального развития, конкурентоспособности и даже устойчивости. В целом под кластеризацией понимается концентрация отраслей и компаний в определённой географической области и их взаимосвязь. Кроме того, такие факторы, как большое число фирм, находящихся в непосредственной близости друг от друга, конкуренция и сотрудничество между этими фирмами, высокая доля мелких фирм, наличие тесных социально-экономических сетей, быстрое распространение информации и идей, адаптивность и гибкость характерны для промышленных кластеров [2, Dawkins C.; 3, Pipegorolous P.G.]. В связи с появлением и эволюцией экономики, основанной на знаниях, университеты стали признаны ключевыми игроками в региональном экономическом развитии и формировании кластеров [4, Wolfe D.A.]. Аналогичным образом в растущем объёме литературы подчёркивается важность инноваций и научно-исследовательской деятельности (НИОКР) для устойчивости отдельных фирм и региональной экономики [5, Bristow G., Healey A.]. Вместо подробного описания роли НИОКР и высшего образования в формировании кластера центров обработки данных в каком-либо заранее определённом регионе тематических исследований, в настоящей статье используется целостный подход и принимается попытка определить характеристики, общие для нескольких холодных северных регионов.

Проблемы исследования центров обработки данных, которые обусловлены ограниченным объёмом информации, находящейся в открытом доступе, и элементом секретности,

окружающим эти промышленные пространства, были признаны различными исследователями [6, Vonderau A. с. 702, 707; 7, Hogan M., Vonderau A.]. Хотя доступ к информации, получаемой в результате НИОКР частных предприятий, затруднён в большей степени, чем к продукции исследователей, приверженных принципам открытой науки, настоящая статья затрагивает вопросы производства знаний как в частном, так и в государственном секторах, а также сотрудничества между ними. Для достижения поставленных целей авторы опросили заинтересованные стороны, представляющие индустрию центров обработки данных, различные уровни управления и представителей научных кругов, чтобы дополнить информацию, которую можно получить из открытых источников или из различных СМИ, освещающих вопросы, касающиеся центров обработки данных. Значительная часть информации также была собрана в рамках процесса наблюдения с привлечением широкого круга участников. Юха Саунаваара обратился к представителям индустрии центров обработки данных, правительственным чиновникам и исследователям с просьбой провести высокотехнологичные исследования, выступая в качестве неспециалиста с опытом работы в социальных науках. Тем временем Антти Лайне в течение десяти лет работал на частных предприятиях, проектирующих центры обработки данных. В 2019–2020 гг. он также исполнял обязанности директора Финского форума центров данных, где продолжает выступать в роли эксперта, а также имеет опыт представления отрасли на переговорах с государственными органами. Таким образом, у авторов исследования соблюдается баланс между измерениями «наблюдения» и «участия».

Особенности научно-исследовательской деятельности в арктических и северных центрах данных

Хотя недавнее исследование показало, что общее потребление энергии центрами обработки данных выросло в меньшей степени, чем ожидалось ранее, ввиду развития технологий [8, Masanet E., Shehabi A., Lei N.], это чрезвычайно энергоёмкий бизнес, который, похоже, не соответствует политике энергосбережения и целям сокращения выбросов углерода. Поэтому вопрос о том, почему многие страны, регионы и города пытаются привлечь инвестиции в центры обработки данных посредством мер, варьирующихся от налоговой политики и строительства вспомогательной инфраструктуры до муниципального зонирования, помощи с разрешениями и организации связи с местными подрядчиками, остаётся актуальным. Помимо рассмотрения ответа с точки зрения создания дополнительных рабочих мест и налоговых поступлений, обоснование этих попыток также можно найти в относительной экологичности центров обработки данных, особенно расположенных на Севере. Хотя центры обработки данных, оборудованные таким образом, чтобы обеспечить концентрированное и эффективное использование программного и аппаратного обеспечения в одном месте, потребляют огромное количество энергии, оно по-прежнему значительно меньше, чем было бы, если бы вычислительные мощности / серверы были распределены между различными

локациями. Иными словами, значительная экономия энергии может быть достигнута, если сервер, работающий в центре обработки данных, позволяет отключить большое количество других устройств за пределами центров [9, Peuhkuri M., Lääkkölä R., Costa-Requena J., Mapper J.]. Высокая энергоэффективность центров хранения и обработки данных, расположенных в Северном Приполярном регионе, отчасти объясняется холодным климатом, однако следует отметить, что повышение энергоэффективности зачастую происходит в результате проводимых в этом районе НИОКР.

Содержание исследований и проектов, осуществляемых в Арктике и на Севере, зачастую связано со сложившимися условиями. Иными словами, если холодный климат, наличие широких сетей централизованного теплоснабжения³, а также изобилие водных и ветроэнергетических ресурсов могут, как представляется, быть далеки от основных направлений деятельности, т. е. от хранения данных, они повлияют как на исследования, так и на фактическое проектирование объектов центров обработки данных. Кроме того, исследования, касающиеся центров данных, не начинались с нуля, а скорее строились на существующей базе знаний. Исследователи, участвующие в деятельности центров обработки данных, а также персонал, начавший работать в центрах, представляют различные направления подготовки. Для проектирования и строительства зданий требуются специалисты, например, в области архитектуры и строительства, противопожарной защиты, распределения электроэнергии и энергосистем, охлаждения, (жидкостной) механики и автоматизации. Между тем, работа и оптимизация центров обработки данных требуют знаний о встроенных системах, облачных сервисах, программном обеспечении, больших базах данных и так далее. Некоторые из необходимых навыков уже имелись в северных регионах, и появилась возможность привлечь исследователей из других областей и квалифицированную рабочую силу из других промышленных секторов⁴.

Мобильность рабочей силы между фирмами, ведущая к передаче знаний и стимулированию инноваций, а также возможность нанимать опытных работников, присутствующих на местном рынке труда, определены как типичные особенности для сформировавшихся кластеров [10, Lundmark M., Power D.; 11, Simonen J., Svento R., Karhinen S., McCann P.]. Однако в результате межотраслевой мобильности многие северные компании по созданию центров обработки данных смогли извлечь выгоду из такого рода агломерации уже на ранней стадии процессов формирования кластеров. Хотя может быть затруднительно определить, какие именно НИОКР (например, вопросы, связанные с отоплением, вентиляцией и кондиционированием воздуха) напрямую или опосредованно связаны с центрами обработки дан-

³ В Финляндии, например, централизованное теплоснабжение обеспечивает примерно 90% общей потребности в тепле в крупнейших городах.

⁴ Интервью с Тором Бьёрном Минде, Лулео, Швеция, 02.03.2018.

ных, стало очевидной потребностью в экспертных знаниях о том, как координировать и синхронизировать проектирование различных систем в центрах обработки данных⁵.

Хотя охлаждение и энергоэффективность объектов привлекли внимание операторов и исследователей центров обработки данных во всем мире как средство снижения затрат на электроэнергию и уменьшения углеродных выбросов в атмосферу [12, Wahlroos M., Pärssinen M., Rinne S., Syri S., Manner J., с. 1750], использование холодного климата можно признать одной из особенностей НИОКР, проводимых на Севере. Идея использования холодного климата не нова. Microsoft, например, открыла центр обработки данных в Куинси, штат Вашингтон, в 2006 г., а в 2007 г. сообщалось, что компания подписала меморандум о взаимопонимании с региональными властями Иркутска, Россия, одного из самых холодных мест в мире, относительно возможности создания центра данных. Хотя в Куинси были и другие активы, такие как чрезвычайно низкая стоимость электроэнергии и доступ к 100-процентной возобновляемой гидроэнергетике, которые привлекали инвестиции в центры обработки данных до прихода Microsoft и материализации проекта в России, привлекательность холодного климата для охлаждения естественным способом было признано конкурентоспособным решением⁶.

Когда индустрия центров обработки данных возникла в Исландии (в частности на полуострове Рейкьянес) как новое направление экономического роста в течение нескольких лет после краха банковского бизнеса в 2008 г., холодный климат и обильные возобновляемые источники энергии были определены как наиболее ценные активы. Аналогичным образом, с начала 2010-х гг. Канада, в которой расположены различные центры обработки данных, рекламирует дешёвую энергию, стабильное общество и суверенитет данных (актуально в сравнении с Патриотическим актом в Соединённых Штатах, который обеспечивает правительственный доступ к данным) при описании собственных территорий, подходящих для естественно-воздушного охлаждения⁷.

⁵ Интервью с Тором Бьёрном Минде, Лулео, Швеция, 02.03.2018.

⁶ Fried I. Microsoft plans Russian data center. URL: <https://www.cnet.com/news/microsoft-plans-russian-data-center/> (дата обращения: 13.04.2020); Miller R. Microsoft Plans Data Center in Siberia. URL: <https://www.datacenterknowledge.com/archives/2007/11/26/microsoft-plans-data-center-in-siberia> (дата обращения: 13.04.2020); Hassell J. Take a look inside Microsoft's Quincy, Wash. Data center. URL: <https://www.computerworld.com/article/3136160/take-a-look-inside-microsofts-quincy-wash-data-center.html#slide2> (дата обращения: 13.04.2020); Chernicoff D. Inside Microsoft's Quincy data center. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/inside-microsofts-quincy-data-center/> (дата обращения: 13.04.2020).

⁷ McCarthy S., Saitta E. IMMI Research Report: Islands of Resilience – Comparative Model for Energy, Connectivity and Jurisdiction. Realizing European ICT possibilities through a case study of Iceland. September 2012. URL: https://www.greens-efa.eu/files/assets/docs/study_islands_of_resilience.pdf (дата обращения: 15.04.2020); Broad-Group, Iceland's competitive advantages as a global Data Centre location. URL: <https://docplayer.net/6699149-Iceland-s-competitive-advantages-as-a-global-data-centre-location.html> (дата обращения: 13.04.2020); Beal V. Why Putting Your Data Center in Canada Makes Sense. URL: <https://www.cio.com/article/2391505/why-putting-your-data-center-in-canada-makes-sense.html> (дата обращения: 13.04.2020); Brent P. Quebec firm investing in Canadian data centres. URL: <https://renx.ca/quebec-firm-investing-canadian-data-centres/> (дата обращения: 13.04.2020).



Примеры муниципалитетов и регионов, в которых размещены центры обработки данных (упоминаются в статье)

- 1) Luleå-Piteå-Boden
- 2) Hamina
- 3) Mäntsälä
- 4) Kajaani
- 5) Mo i Rana
- 6) Ballangen
- 7) Reykjanes peninsula
- 8) Quincy
- 9) Ishikari

Рис. 1. Примеры муниципалитетов и регионов, в которых размещены центры обработки данных.

Естественно-воздушное охлаждение — не единственный метод охлаждения в Арктике и на севере; Google, например, использует морскую воду для охлаждения своего гипермасштабного центра обработки данных в Хамине, Финляндия. Однако в целях снижения коэффициента эффективности использования энергии (PUE), описывающего эффективность использования энергии в центре данных, естественно-воздушное охлаждение послужило объектом в различных исследованиях в последнее десятилетие. Одна из статей, опубликованная в 2011 г. исследователями из Университета Аалто и утверждающая, что является первым исследовательским докладом о центрах данных из Финляндии, была сосредоточена на воздушном управлении и энергоэффективности систем охлаждения, а также подготовила почву для дальнейших исследований, которые будут проводиться на базе университета в Хельсинки [13, Lu T., Lu X., Remes M., Viljanen M.].

RISE ICE Datacenter⁸, среда для исследований и тестирования инфраструктуры и облачных вычислений на севере Швеции, была открыта в январе 2016 г. в непосредственной близости от Технологического университета Лулео. С самого начала инициативы по минимизации энергопотребления в центрах обработки данных были частью её исследовательского портфолио. В то время как ранние проекты, начатые в сотрудничестве с местным университетом, по разработке новых путей использования различий в давлении воздуха в центре

⁸ Центр обработки данных ICE управляется и принадлежит RISE SICS North, дочерней компании некоммерческой организации RISE SICS, которая проводит передовые и фокусные исследования в стратегических областях информатики в тесном сотрудничестве со шведской и международной промышленностью и научными кругами.

данных для контроля воздушного потока и сокращения использования вентиляторов получили финансирование из национальных и региональных источников⁹, текущий проект BodenTypeDC был отмечен наградами, привлёк внимание средств массовой информации и получил финансирование в рамках программы ЕС Horizon 2020. В ходе проекта был построен и испытан высокоэффективный прототип центра обработки данных с низким PUE (как сообщается, всего 1,007). В дата-центре, расположенном в городе Боден, используются только возобновляемые источники энергии и передовые технологии охлаждения¹⁰.

Таблица 1

Различные типы центров обработки данных¹¹

Гипермасштабный центр обработки данных	Мощности свыше 20 МВт. Принадлежит и управляется поддерживающей компанией. Предлагает надёжные, масштабируемые приложения и портфель услуг для хранения данных. Обычно располагается в непосредственной близости к электросети в районах с избытком электроэнергии. Как правило, имеет свыше 500 кабинетов (минимум 5 000 серверов) и занимает площадь не менее 10 000 кв. футов (930 кв. метров).
Корпоративный центр обработки данных	Принадлежит и управляется поддерживающей компанией, зачастую построен локально, по месту эксплуатации. Может использовать услуги сторонних организаций для первичного оснащения и установки сетей перед непосредственной эксплуатацией и управлением. Имеет более 10 кабинетов, мощности могут достигать 40МВт.
Совместный центр обработки данных	Владелец центра обработки данных продаёт пространство, электроэнергию и предоставляет услуги охлаждения нескольким корпоративным, облачным и гипермасштабным клиентам в определённом месте. Предлагает взаимодействие с программным обеспечением как услугой (SaaS) или с платформой как услугой (PaaS). Позволяет предприятиям развиваться с минимальными сложностями при низких затратах. Клиенты могут арендовать столько кабинетов, сколько необходимо. Может вместить от сотен до тысяч индивидуальных клиентов.
Облачный	Объекты, принадлежащие и управляемые облачными компаниями, обеспечивают доступность ресурсов компьютерных систем по запросу, в частности хранилищ данных и вычислительных мощностей. Доступно многим пользователям через Интернет. Крупные облачные провайдеры создают многосайтовые сети.

Хоккайдо, самый северный остров Японии, расположен к югу от Арктики, но его природные условия, в частности, холодные зимы с обильными снегопадами, очень похожи на условия более высоких широт. Его холодный климат был признан потенциальным активом в планах регионального развития, а попытки привлечь центры обработки данных начали предприниматься уже десять лет назад [14, Saunavaara J., с. 329]. В то время как низкие цены на землю и низкий риск землетрясений использовались в сфере маркетингового привлечения, учёные из Хоккайдо проводили исследования и разработки с использованием снега, который собирается зимой для охлаждения летом. Хотя различные методы охлаждения снегом и льдом имеют более долгую историю в других отраслях промышленности на Хоккайдо,

⁹ ICE RISE SICS North, DRAFT: A new project to save energy in datacenter. URL: <https://ice.sics.se/draft-new-project-save-energy-datacenter/> (дата обращения: 13.04.2020).

¹⁰ European Commission, Novel data centre enters the spotlight thanks to its energy- and cost-saving concept. URL: <https://cordis.europa.eu/article/id/413286-novel-data-centre-enters-the-spotlight-thanks-to-its-energy-and-cost-saving-concept> (дата обращения: 13.04.2020); ICE RISE SICS North, Inauguration of the Boden Type Data Center One. URL: <https://ice.sics.se/inauguration-boden-type-data-center-one/> (дата обращения: 13.04.2020).

¹¹ Основано на источнике: Nordic Council of Ministers. Data Center Opportunities in the Nordics. An analysis of the competitive advantages, 2018; AFL Hyperscale, Understanding Different Types of Data Center. URL: <https://www.aflhyperscale.com/understanding-different-types-of-data-center> (дата обращения: 14.04.2020).

предложения по применению этих методов, подходящих для центров обработки данных, уже были представлены¹². Однако использование снега не получило широкого распространения в других северных регионах.

Хотя PUE, безусловно, является наиболее известным показателем инфраструктуры центра обработки данных, его критикуют как несовершенный показатель в случаях, когда возникает необходимость описать общую энергоэффективность. Уравнение PUE, например, не учитывает, насколько энергоэффективно ИТ-оборудование, и не существует согласованного на глобальном уровне стандарта для измерения PUE. Появление новых показателей, таких как эффективность повторного использования энергии (ERE) или коэффициент повторного использования энергии (ERF), отражает недавние изменения в индустрии центров обработки данных и исследованиях. Другими словами, в основном из-за большего внимания, уделяемого экологическому воздействию отрасли, вопросы, касающиеся сбора и повторного использования отработанного тепла, образующегося в центрах обработки данных, привлекли внимание как промышленности, так и научных кругов. Хотя повторное использование тепла изучается в разных частях мира [15, Patterson M.K., VanGeet O., Tschudi W., Azevedo D.; 16, Marcinichen J.B., Oliver J.A., Thome J.R.; 17, Ebrahimi K., Jones G.F., Fleischer A.S.; 18, Ebrahimi K., Jones G.F., Fleischer A.S.; 19, Davies F.F., Maidment G.G., Tozer R.M.]¹³, страны Северной Европы считаются мировыми лидерами в исследованиях и новаторами в фактическом использовании отработанного тепла центров обработки данных¹⁴. Следовательно, они уже хорошо подготовлены к тому, что законодательство может либо направить, либо вынудить отрасль центров обработки данных к повторному использованию тепла в будущем.

Использование побочных потоков промышленного процесса соответствует широко поддерживаемым принципам циркулярной экономики; однако утилизация отходящего тепла, которое может улавливаться, также сопряжена с проблемами. В частности, температура отработанного тепла центра обработки данных часто слишком низкая (30–40 °C), чтобы его можно было использовать и применять в различных процессах. Однако эта проблема была, по крайней мере, частично решена за счёт развития технологии тепловых насосов. Кроме того, рекуперация отработанного тепла центра обработки данных технически имеет смысл только тогда, когда доступны разумные способы его использования. С экономической точки зрения повторное использование отработанного тепла центра обработки данных целесообразно только в том случае, если оно имеет конкурентоспособную цену по сравнению с теп-

¹² Hokkaido Government, Hokkaido Business Location Guidebook – As of May 2019; Kyocera Communication Systems, 100% saisei kanō enerugii, zero emisshon – deeta sentaa wo hokkaidō ishikari ni kaigyō. URL: <https://www.kccs.co.jp/news/release/2019/0107/> (дата обращения: 13.04.2020).

¹³ Однако, например, в 682-страничном Руководстве по центрам обработки данных (под редакцией Хвайю Гэн), опубликованном в 2015 году (Wiley), этой теме посвящен только один короткий абзац.

¹⁴ Примеры повторного использования тепла центров обработки данных в Скандинавии: Vela J., Helsinki data centre to heat homes. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2010/jul/20/helsinki-data-centre-heat-homes> (дата обращения: 14.04.2020); Lähienergia.Mäntsälässä hukkalämpö on arvokas energianlähde. URL: <https://www.lahienergia.org/mantsalassa-hukkalampo-arvokas-energialahde/> (дата обращения: 21.04.2020).

ловыми станциями и отработанным теплом из других отраслей промышленности. Например, в странах Северной Европы высококачественные (высокотемпературные) отходы тепла лесной, химической и сталелитейной промышленности используются уже относительно широко¹⁵.

MAP 2: District heating plants in Finland, 1

July 2015. (Author: Energiategollisuus ry. Kaukolämpö Suomessa.png. This file is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International license.)



Рис.2. Карта 2: предприятия централизованного теплоснабжения в Финляндии, 1 июля 2015 г.

Исследования повторного использования тепла можно условно разделить на два направления. Первое включает исследования, сосредоточенные на повторном использовании тепла в системе централизованного теплоснабжения. Они были проведены в центре обработки данных RISE ICE¹⁶ и в университете Аалто [20, Wahlroos M., Pärssinen M., Manner J., Syri S.; 12, Wahlroos M., Pärssinen M., Rinne S., Syri S., Manner J.; 21, Pärssinen M., Wahlroos M., Syri S., Manner J.]. Эти исследования часто были сосредоточены на попытках повысить температуру тепла, исходящего из центров обработки данных. В то время как тепловые насосы, которые часто были в центре таких исследований, уже используются (например, центр обработки данных Яндекса в Мянциля, Финляндия, продаёт своё отработанное тепло местной

¹⁵ Интервью с Тором Бьёрном Минде, Лулео, Швеция, 2 марта 2018 г.; Интервью с Петри Хююппя, Оулу, Финляндия, 5 февраля 2020 г.; Интервью с Суви Линден, Оулу, Финляндия, 06.02.2020.

¹⁶ Интервью с Тором Бьёрном Минде, Лулео, Швеция, 2 марта 2018 г.; ICE RISE SICS North, Our challenging and exciting EU H2020 project application on datacenters and fuel cells was granted. URL: <https://ice.sics.se/challenging-exciting-eu-h2020-project-application-datacenters-fuel-cells-granted/> (дата обращения: 13.04.2020); ICE RISE SICS North, We have received a positive funding decision from Energiforsk for our project Virtual heating plants. URL: <https://ice.sics.se/received-funding-decision-energiforsk-project-virtual-heating-plants/> (дата обращения: 13.04.2020).

энергетической компании, используя тепловые насосы для нагрева до 85 градусов Цельсия), методы жидкостного охлаждения также были протестированы с позиции достижения более высоких температурных уровней для повышения эффективности использования отходящего тепла центров данных в системе централизованного теплоснабжения. В то же время уделялось особое внимание эффективности тепловых насосов и развитию сетей централизованного теплоснабжения, поскольку новые сети будут лучше приспособлены для использования отходящего тепла с более низкой температурой. Исследования этих технологий сопровождалась экономической оценкой инвестиций и исследованиями, анализирующими бизнес-модели и возможности снижения эксплуатационных расходов на уровне системы централизованного теплоснабжения в случае использования отработанного тепла центра обработки данных. На рис. 2 в качестве примера используется Финляндия для демонстрации широкого распространения систем централизованного теплоснабжения в странах Северной Европы (более 15 000 км). Наличие системы централизованного теплоснабжения в различных частях страны повышает гибкость решений, касающихся размещения центров хранения и обработки данных.

Второе направление исследований повторного использования тепла сосредоточено на других областях применения, нуждающихся в низкотемпературном тепле. Теплицы, рыболовецкие фермы и сушка биомассы — примеры потенциальных видов деятельности, на которые обратили внимание как учёные, так и предприятия центров обработки данных. Хотя эти области могут повысить энергоэффективность, поскольку они не требуют использования тепловых насосов, это не так просто. Наиболее важно то, что использование низкотемпературного отходящего тепла требует, чтобы взаимозависимые объекты располагались в непосредственной близости друг от друга¹⁷. Хотя ограничения существующих площадок и вопросы бизнес-моделей, приемлемых для всех сторон, возможно, препятствовали развитию, уже есть примеры синергетического сотрудничества между центрами обработки данных и теплицами¹⁸.

Обсуждение способности интеллектуальных сетей и промышленных объектов реагировать, например, на аварийные ситуации в сети или перегрузки, ставящие под угрозу баланс спроса и предложения электроэнергии, не является чем-то новым [22, Ghatikar G., Piette M. A., Ganti V., с. 577]. Однако интеграция центров обработки данных в национальную и ре-

¹⁷ Интервью с Тором Бьёрном Минде, Лүлео, Швеция, 2 марта 2018 г.; RISE, Data Center for Greenhouse farming. URL: <https://www.ri.se/en/what-we-do/projects/data-center-greenhouse-farming> (дата обращения: 13.04.2020); ICE RISE SICS North, Vinnova has granted funding for our project DC-Farming together with LTU and The Food Print Lab. URL: <https://ice.sics.se/vinnova-granted-funding-project-dc-farming-together-ltu/> (дата обращения: 13.04.2020); ICE RISE SICS North, Vinnova granted a pre-study on heat re-use from datacenters in biomass drying. URL: <https://ice.sics.se/vinnova-granted-pre-study-heat-re-use-datacenters-biomass-drying/> (дата обращения: 13.04.2020); ICE RICE SICS North, Biomass drying using residual heat from datacenters. URL: <https://ice.sics.se/biomass-drying-using-residual-heat-datacenters/> (дата обращения: 13.04.2020).

¹⁸ ePressi, Yritykset laajentavat ja rakentavat uutta Mänsälässä. URL: <https://www.epressi.com/tiedotteet/yritykset-laajentavat-ja-rakentavat-uutta-mantsalassa.html> (дата обращения: 13.04.2020); Телефонное интервью с Ари Курви, Финляндия, 20.04.2020.

гиональную систему спроса и предложения энергии может быть признана ещё одной отличительной чертой научно-исследовательской деятельности, проводимой на Севере. Попытки ответить на вопросы, касающиеся оптимизации энергоснабжения и потребления, интеграции интеллектуальных сетей и роли центров обработки данных в сетях, где рост производства электроэнергии из возобновляемых источников зависит от природных условий, что увеличивает волатильность, привели к академическим исследовательским работам и сотрудничеству между промышленностью и наукой, а также спровоцировали конкретные действия, предпринимаемые коммерческими центрами обработки данных, работающими на конкурентных рынках.

Один из первых проектов на севере Швеции, признающий растущее количество дискретных источников питания и возросшую потребность в упреждающей балансировке нагрузки и мощности, был запущен в 2016 г. и направлен на работу центров обработки данных с локальным энергоснабжением солнечных панелей и электросети. В исследованиях основное внимание уделялось взаимодействию центра обработки данных с электросетью и изучению возможностей обеспечения сбалансированности потребностей в электроэнергии. В качестве примера в работах рассматривались местные тепловые накопители, например, в контексте возможности производства охлаждённой воды при низком спросе на электроэнергию и её использования при высоком спросе на электроэнергию¹⁹. Последующие проекты в RISE ICE Datacenter были нацелены на снижение затрат на электроэнергию и пиковых нагрузок за счёт изучения способов оптимизации работы центра обработки данных с его собственной микросетью. После анализа прогнозов температуры, солнечного излучения, затрат на электроэнергию и рабочей нагрузки в процессе машинного обучения должны приниматься оптимальные решения. В последнее время подобные вопросы также изучаются в сотрудничестве с партнёрами из Центральной Европы²⁰.

Специфика возобновляемых источников энергии и необходимость гибких резервов мощности были признаны основополагающими в этой отрасли. Например, центр обработки данных Aurora, расположенный в Оулу на севере Финляндии, в сотрудничестве с Eaton и Fortum инициировал пилотный проект по переносу своего центра обработки данных с объекта, требующего электроэнергии, на объект, который может самостоятельно поддерживать сеть и генерировать доход от этого вида деятельности. Центр обработки данных, в котором размещены две 3000-килограммовые литиевые батареи и который имеет собственные источники бесперебойного питания (ИБП), подключённые к национальной сети, может вносить не-

¹⁹ ICE RISE SICS North, Swedish energy agency is funding our project on data center and grid integration. URL: <https://ice.sics.se/swedish-energy-agency-funding-project-datacenter-grid-integration/> (дата обращения: 13.04.2020);

²⁰ ICE RISE SICS North, Swedish Energy Research Centre has granted a project on AI for datacenter micro-grid integration. URL: <https://ice.sics.se/swedish-energy-research-centre-granted-project-ai-datacenter-micro-grid-integration/> (дата обращения: 13.04.2020).

медленные корректировки в энергопотребление и получать компенсацию от сетевой компании²¹.

Способность балансировать спрос и вносить коррективы в тех случаях, когда природные условия становятся временно неблагоприятными для ветровой или солнечной энергии, является не единственным связующим звеном между центрами данных и производством возобновляемой энергии. Операторы центров обработки данных, управляющие объектами в разных частях мира, могут контролировать своё энергопотребление, предоставляя одни и те же услуги в разных географических точках в разное время суток. Этот метод, позволяющий компаниям центров обработки данных потреблять более дешёвую электроэнергию в непиковые часы, также можно использовать для определения регионов, где из-за условий окружающей среды количество доступной возобновляемой энергии временно недостаточно. Более того, многие компании, особенно те, которые являются потребительскими брендами, уже рекламируют, что их центры обработки данных работают на возобновляемых источниках энергии, и давление в сторону перехода всей отрасли на экологически чистые источники энергии становится всё сильнее. Если изучить первоисточники этой тенденции, можно найти такие проекты, как проект GreenStar Net-work, основанный в Канаде в 2010 г. Цель проекта, который был сосредоточен на центрах обработки данных, построенных вблизи источников зелёной энергии, заключалась в предоставлении облачных услуг ИКТ, полностью основанных на возобновляемых источниках энергии [23, Nguyen K.K., Cheriet M., Lemay M., Reijs V., Mackarel A., Pastrama A., с. 2538–2539]. В настоящее время центры обработки данных либо покупают экологически чистую энергию у традиционных производителей, либо осуществляют прямые инвестиции в возобновляемые источники энергии.

Компания Sakura Internet открыла один из крупнейших центров обработки данных в Японии в Исикари, Хоккайдо, и построила собственные солнечные электростанции. Кроме того, Kyocera Communication Systems, которая планирует построить первый в Японии центр обработки данных с использованием 100% возобновляемых источников энергии в том же городе, будет инвестировать в энергию ветра, солнца и биомассы²². В то время как высокие местные цены на электроэнергию могут частично объяснить решение этих компаний инвестировать в собственное производство энергии, примеры аналогичной деятельности также можно найти в других северных регионах, которые находятся намного ближе к Полярному кругу и где энергия дешевле. Респондент, представляющий центр обработки данных в северной Финляндии, отметил, что солнечная энергия хорошо подходит для индустрии центров обработки данных. Это особенно актуально для севера, где количество солнечных часов в год может быть относительно большим, поскольку полуденное солнце летом компен-

²¹ Интервью с Петри Хююппя, Оулу, Финляндия, 05.02.2020.

²² Sakura Internet. URL: <https://www.sakura.ad.jp/en/corporate/datacenter/> (дата обращения: 13.04.2020); Kyocera Communication Systems, 100% saisei kanō enerugii, zero emisshon – deeta sentaa wo hokkaidō ishikari ni kaigyō. URL: <https://www.kccs.co.jp/news/release/2019/0107/> (дата обращения: 13.04.2020).

сирует отсутствие солнечных дней зимой, создавая годовой баланс, хорошо подходящий для центров обработки данных, которые имеют более высокие потребности в энергии в летние месяцы из-за необходимости охлаждения²³. Однако вызывает сомнения, что гиганты центров обработки данных, такие как Amazon, Apple, Facebook, Google или Microsoft, займут позитивную позицию в отношении регулирования, как это запланировано, например, в Дании, что заставило бы их строить и эксплуатировать электростанции, обслуживающие их гипермасштабные центры обработки данных.

Согласно одному из определений, зелёный центр обработки данных — это достижение максимальной вычислительной производительности при минимальном потреблении энергии [24, AlLee G., с. 416]. Эта концепция используется, например, в исследовательском проекте Cloud-berry Datacenters, который координируется Технологическим университетом Лулео, с целью реализации широкого спектра мероприятий, начиная от охлаждения и рекуперации энергии и её повторного использования до повышения эффективности использования ресурсов в процессах программного обеспечения, для интеграции с национальными и местными энергетическими системами под единым началом. Исследования по автоматизированному контролю, техническому обслуживанию и управлению в рамках этого исследования предшествовали разработке автономных центров обработки данных, которые можно признать ещё одной тенденцией текущих и будущих исследований и разработок²⁴. В общих чертах, автономный центр обработки данных должен иметь возможность эффективно продолжать свою работу и самовосстанавливаться без какого-либо вмешательства человека, даже при возникновении непредвиденных обстоятельств, таких как сбой питания или неисправность компонентов. На Севере вопросы, связанные с подобным изменением парадигмы в работе центров обработки данных, привели к трансграничному сотрудничеству с участием академических исследовательских институтов и частных предприятий. Например, в проекте AutoDC участвуют партнёры из Швеции, Финляндии и Канады²⁵. Между тем, уже в 2016 г. Google сообщил об успешном использовании искусственного интеллекта (AI), контролирующего около 120 переменных в центре обработки данных, таких, например, как система охлаждения, для достижения значительного снижения энергопотребления²⁶. Хотя в отношении этого всё ещё существует некоторый скептицизм, будущие шаги в области удалённого мониторинга и оптимизации искусственного интеллекта могут привести к созданию центров обработки

²³ Интервью с Петри Хююппя, Оулу, Финляндия, 5.02.2020.

²⁴ Cloudberry. URL: <https://www.cloudberry-datacenters.com/subprojects-20315292> (дата обращения: 14.04.2020); ICE RISE SICS North, A holistic approach on automation in data centers – a new EUREKA project. URL: <https://ice.sics.se/a-holistic-approach-on-automation-in-data-centers-a-new-eureka-project/> (дата обращения: 14.04.2020).

²⁵ AutoDC. URL: <https://autodc.tech/about/> (дата обращения: 14.04.2020).

²⁶ Moss S. Google uses DeepMind AI to cut data center PUE by 15%. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/google-uses-deepmind-ai-to-cut-data-center-pue-by-15/> (дата обращения: 15.04.2020); DeepMind. DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40%. URL: <https://deepmind.com/blog/article/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-40> (дата обращения: 15.04.2020).

данных, работающих без участия людей. Эта концепция расширит уже существующую модель удалённого управления, стремясь к более высокой эффективности за счёт отказа от потребления энергии, необходимой для обеспечения потребностей и создания комфортных условий для персонала²⁷.

Ещё одной тенденцией является децентрализация и растущая важность современных вычислительных систем, которые формируют будущее бизнеса центров данных Арктики и Севера. Периферийные вычисления — это обработка огромных объёмов (сенсорных) данных в режиме реального времени (или с очень малым временем отклика). В случае, если будут созданы меньшие вычислительные единицы и единицы хранения данных, и большая их часть будет доступна для пользователей, концепция, согласно которой малонаселённые арктические и северные регионы могут выступить в качестве хостов для данных, которые не зависят от задержки времени отклика, может получить дальнейшее развитие. Вместе с тем в странах Арктики также существуют значительные различия, и не все регионы одинаково подходят для удовлетворения требований хранения различных типов данных. В случае России и Канады развитие периферийных вычислений, вероятно, будет сосредоточено в крупнейших мегаполисах. Кроме того, южные части Швеции, Норвегии и Финляндии, а также Дания (за исключением Гренландии и Фарерских островов), которые находятся недалеко от крупных центров обработки данных в Европе и где сконцентрировано население и промышленность, лучше подходят для предоставления услуг, зависящих от задержки времени отклика, чем северные районы. Хотя вопрос, который можно было бы определить как особо важный для НИОКР, проводимых на Приполярном Севере, не является вопросом, заслуживающим особого внимания, тем не менее, можно было бы изучить результаты исследований, сосредоточенных на передовых центрах обработки данных и связях между различными типами центров данных²⁸.

Исследования, описывающие экономическое влияние северных центров обработки данных и их значение для общества

Хотя исследования, касающиеся центров обработки данных, проводились в различных местах Приполярного Севера, индустрия информационных центров, а также отдельные сайты и объекты, существующие в регионе, также послужили основой для ряда работ. Публикуемые отчёты и статьи можно разделить на две категории. Первая группа состоит из исследований, в которых основное внимание уделяется экономическому влиянию центров об-

²⁷ Donoghue A. Beyond Lights-Out: Future Data Centers Will Be Human-Free. URL: <https://www.datacenterknowledge.com/design/beyond-lights-out-future-data-centers-will-be-human-free> (дата обращения: 21.04.2020).

²⁸ Интервью с Тором Бьёрном Минде, Лулео, Швеция, 02.03.2018; Mehta R. Are Autonomous data centers on the horizon? URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/are-autonomous-data-centers-on-the-horizon/> (дата обращения: 15 April 2020); RISE, Inauguration of a unique edge test datacenter. URL: <https://news.cision.com/rise/r/inauguration-of-a-unique-edge-test-datacenter,c2720659> (дата обращения: 15.04.2020); Nishimoto S. Hakodate miraidai – sakura intaanetto kyōdō kenkyū. [chūshō] renketsu de nōryoku kōjō. Hokkaido Shinbun, 14.11.2019.

работки данных, региональным преимуществам и инвестиционным решениям. Работы, представляющие вторую категорию, обычно направлены на изучение материальной стороны облачных сервисов / Интернета и рассматривают центры обработки данных сквозь призму антропологии или исследований средств массовой информации. Эти статьи были написаны и опубликованы в академических учреждениях, но исследования, попадающие в первую категорию, зачастую были заказаны частными предприятиями или государственными органами и проводились консультантами.

Отчёты, описывающие общее экономическое влияние гипермасштабных объектов, созданных Google и Facebook в странах Северной Европы, представляют собой хорошо известные примеры исследований, ориентированных на бизнес и региональное развитие. Согласно этим отчётам, которые были заказаны соответствующими компаниями и выполнены международными консалтинговыми организациями, инвестиционные решения, касающиеся гипермасштабных центров обработки данных, измеряются в сотнях млн евро и могут создавать налоговые поступления и рабочие места для тысяч человек (напрямую и посредством субподряда). Хотя влияние на уровень занятости наиболее велико в период строительства, рассмотренные случаи показали, что этот этап может продолжаться годами, поскольку компании продолжают инвестировать в выбранные ими территории ²⁹.

Кроме того, было подготовлено несколько отчётов, посвящённых развитию отрасли в целом или (гипотетическому или предыдущему) появлению гипермасштабных центров обработки данных в северных регионах, например, в Швеции и Норвегии, на основе инициатив, предпринятых национальными и региональными властями ³⁰. В этом и других отчётах, касающихся рассматриваемой отрасли, часто отсутствует анализ, охватывающий весь жизненный цикл центров обработки данных. Хотя многие центры обработки данных были открыты на объектах, которые первоначально обслуживали другие виды тяжёлой промышленности, практически никакого внимания не уделялось вопросу о том, что происходит с объектами центра хранения и обработки данных после их закрытия.

Антропологические исследования центров обработки данных в Швеции, Дании и Исландии были проведены учёными, непосредственно связанными с университетами как внутри, так и за пределами Арктики и Севера. Такого рода исследования, как правило, включают в себя долгосрочную выездную работу, интервью и совместное наблюдение в север-

²⁹ The Boston Consulting Group. Digital infrastructure and economic development. An impact assessment of Facebook's data center in Northern Sweden, 2014; Oxford Research. Finland's Giant Data Center Opportunity. From the Industrial Heartland to Digital Age, 2015; Copenhagen Economics. Finland's economic opportunities from data centre investments: A study prepared for Google, 2017; Copenhagen Economics. Google's Hyperscale Data Centres and Infrastructure Ecosystem in Europe: Economic Impact Study, 2019.

³⁰ Ylinenpää H. Etableringen av Facebooks europeiska datacenter i Sverige och Luleå. Tillväxt Verket Rapport 0170, 2014; Granberg A. Effecten av Facebooks etablering för Luleå Science Park som regional nod. Luleå Science Park, 2014; The Boston Consulting Group. Capturing the Data Center Opportunity: How Sweden Can Become a Global Front-Runner in Digital Infrastructure, 2016; Menon Economics. Rapport: Gevinster knyttet til etablering av et hyperscale datasenter i Norge. Menon-Publikasjon Nr. 39/2017, 2017; Sweco. Effekter av Facebooks etablering i Luleå: En studie av effekter på regional och nationell nivå, 2017.

ных общинах, в которых размещаются крупномасштабные центры обработки данных. Учёные исследовали инфраструктуру облачных вычислений, и, таким образом, поставили под сомнение теорию о нематериальном или неосязаемом Интернете, который описывался как нечто, появляющееся повсюду и нигде в частности. Эти исследования описывают философское, политическое, социальное и экологическое воздействие облачных инфраструктур, а также социально-технические комплексы, которые возникают в ходе процессов создания инфраструктуры. Некоторые учёные подчёркивали влияние инфраструктурной наследственности и изучали локализацию и интеграцию промышленных ландшафтов. Они выяснили, что многие центры обработки данных были построены в помещениях других отраслей, которые больше не функционируют, и показали, как новая промышленная деятельность становится частью процессов государственного строительства и формирования региональной идентичности. И наконец, внимание было также уделено недостаточному участию общественности, а также ожиданиям и представлениям, воплощённым в проектах центров обработки данных, которые зачастую осуществляются в условиях большой секретности [25, Vonderau A.; 6, Vonderau A.; 26, Johnson A.; 7, Hogan M., Vonderau A.; 27, Johnson A.; 28, Maguire J., Winthereik B.R.].

Проблемы обучения и найма компетентной рабочей силы

В странах Северной Европы отмечается высокий общий уровень образования и технических знаний, и в вышеупомянутом отчёте, подготовленном по поручению Совета министров стран Северной Европы, например, человеческий капитал рассматривается как актив для региона. Вместе с тем, в отчёте также указывается, что когда привлекательность Северного региона сравнивается с Франкфуртом, Лондоном, Амстердамом, Парижем и Дублином (так называемый FLAPD), последние получают более высокие оценки в категории, касающейся наличия компетентной рабочей силы³¹. Наблюдения и обсуждения с участием представителей различных компаний также показали, что нехватка рабочей силы и проблемы с набором персонала известны центрам обработки данных во многих северных регионах, включая страны Северной Европы. В связи с быстрым глобальным ростом отрасли квалифицированные работники могут выбирать компанию и регион, в котором они хотят работать. Кроме того, несмотря на признание необходимости мобилизации образовательных систем для более эффективного удовлетворения потребностей индустрии информационных центров и важности разработки образовательных программ³², эти задачи не были выполнены. Программы получения учёной степени редко пересматриваются, часто являются негибкими и не всегда отвечают меняющимся требованиям индустрии центров обработки данных. Ввиду быстрого развития технологий, новые виды работ, требующие определённой базовой

³¹ Там же.

³² См.: Oxford Research. Finland's Giant Data Center Opportunity. From the Industrial Heartland to Digital Age, 2015, с. 18.

компетенции, появляются и быстро исчезают, и зачастую возникает потребность в дополнительном и ориентированном на конкретные задачи обучении. Кроме того, адаптированные решения, используемые в рамках обслуживания одного или нескольких объектов, также типичны для отрасли, где сделано множество открытий в области НИОКР — зачастую на основе собственного опыта — в частных предприятиях, которые могут не захотеть делиться своими знаниями.

В то время как отсутствие институционализированного университетского образования во многих местах привело к организации тренингов, проводимых частными компаниями и консультантами³³, есть также примеры арктических и северных высших учебных заведений, которые предлагают формализованное обучение в области изучения центров обработки данных и технического надзора. В скандинавских странах уже защищено несколько магистерских и бакалаврских диссертаций в уже упомянутых университетах LTU, Аалто³⁴ и других³⁵. Одна диссертация, защищённая в Технологическом университете Лаппеенранты, даже сыграла важную роль в создании успешной политики региона Мянцеля, направленной на привлечение инвестиций в центры обработки данных за счёт утилизации отработанного тепла³⁶. Кроме того, Университет прикладных наук Юго-Восточной Финляндии (ХАМК) и Объединённое управление по вопросам образования региона Котка-Хамина (Еками), которые находятся в непосредственной близости от гипермасштабного центра обработки данных Google в Хамине, представили учебные модули и программы, направленные на подготовку специалистов для работы в центрах данных³⁷. Кроме того, интересным примером является

³³ Примеры образования: Uptime Institute. URL: <https://uptimeinstitute.com/education> (дата обращения: 29.09.2020); CNet Training. URL: <https://www.cnet-training.com/programs/masters-degree/> (дата обращения: 29.09.2020); CISCO. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/training-events/training-certifications/certifications/associate/ccna-data-center.html> (дата обращения: 29.09.2020); DCPro. URL: <https://www.dcpo.training/allcourses> (дата обращения: 29.09.2020).

³⁴ Примеры: Sorvari J. Konesalin ylijäämälämmön hyödyntäminen Levin Koutalaella. Aalto University, MA Thesis, 2015; Stenberg Å. Tietokonesalien hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksien teknis-taloudellinen optimointi. Aalto University, MA Thesis, 2015; Pärssinen M. Analysis and Forming of Energy Efficiency and GreenIT Metrics Framework for Sonera Helsinki Data Center HDC. Aalto University, MA Thesis, 2016; Linna O. Kansainvälinen katsaus datakeskusten hukkalämmön hyödyntämiseen. Aalto University, BA Thesis, 2016; Olofsson M. Use of Waste Heat from a Data Center. Luleå University of Technology, Independent thesis Advanced Level, 2013; Gille M. Design of Modularized Data Center with a Wooden Construction. Luleå University of Technology, Independent thesis Advanced Level, 2017; Erikson M. Monitoring, Modelling and Identification of Data Center Servers. Luleå University of Technology, Independent thesis Advanced Level, 2018.

³⁵ Kupiainen M. Lämpöpumppu konesalin jäähdytyksessä ja lämmöntalteenotossa. Mikkeli University of Applied Sciences, BA Thesis, 2014; Juvalainen J. Initial Business Concept for the Neighborhood Data Center. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, MA Thesis, 2016; Vuorinen L. Kannattavuusmalli datakeskuksen hukkalämmön hyödyntämiseen kaukolämpöverkossa. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Diplomityö, 2019.

³⁶ Porkka A. Matalalämpöisen hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Diplomityö 2013; Lähienergia. Mäntsälässä hukkalämpö on arvokas energianlähde. URL: <https://www.laheenergia.org/mantsalassa-hukkalampo-arvokas-energialahde/> (дата обращения: 21.04.2020); Phone interview with Ari Kurvi, Finland, 20.04.2020.

³⁷ Oxford Research. Finland's Giant Data Center Opportunity. From the Industrial Heartland to Digital Age, 2015, pp. 15–16, 18; ХАМК, Datakeskuksen korkeakouludiplomi, 60 op. URL: <https://www.xamk.fi/avoimen-amkn-kurssit/datakeskuksen-korkeakouludiplomi-60-op/> (дата обращения: 14.04.2020); YLE. URL: <https://yle.fi/uutiset/3->

узкоспециализированный кластер центров обработки данных в городе Каяани, как из-за масштабного присутствия государственного сектора, так и из-за инвестиций в развитие образования, связанного с центром хранения и обработки данных.

Истоки этой деятельности восходят к 2012 г., когда ИТ-центр науки (CSC), принадлежащий финскому государству, и высшие учебные заведения создали центр обработки данных и суперкомпьютер, а Herman IT, местное частное предприятие, открыло свой центр данных в бизнес-парке Renforsin Ranta. Несмотря на ранний успех Каяани, связанный с бизнес-парком, который был создан на территории бывшей бумажной фабрики, предлагающей готовые помещения, большое количество электроэнергии и оптоволоконную связь, попытки привлечь дополнительные инвестиции (частных) центров обработки данных и ключевых клиентов потерпели неудачу в последующие годы. Однако это не ослабило стремление региона к развитию навыков, необходимых для центров обработки данных, что нашло своё отражение в образовании, предлагаемом местным университетом прикладных наук. Эта программа, специализирующаяся на центрах обработки данных, даёт студентам навыки, связанные с ключевыми продуктами для серверов и рабочих станций, а также с современными сетевыми решениями для организаций. Во время обучения студенты Университета прикладных наук Каяани смогли работать в собственном учебном центре обработки данных, лаборатории постоянного тока. Были также предприняты попытки расширить экосистему центров обработки данных, например, в направлении аналитики данных. Ещё один большой шаг был сделан в 2019 г., когда было объявлено, что центр обработки данных CSC в Каяани был выбран для размещения общеевропейского высокопроизводительного суперкомпьютера, поддерживаемого странами Европы и Евросоюзом. Ожидается, что суперкомпьютер начнёт работу в 2020 г., а отработанное тепло, производимое в центре обработки данных, будет обеспечивать до 20% потребностей региона в централизованном теплоснабжении³⁸.

Хотя возможности повторного использования тепла, производимого суперкомпьютерами, также были реализованы в других местах, например, в Университете Тромсё (UiT),

7763608 (дата обращения: 14.04.2020); EKAMI, Green Data Center. URL: <https://www.ekami.fi/kehittaminen/hankkeet/green-data-center> (дата обращения: 14.04.2020).

³⁸ Интервью с Петри Хююппя, Оулу, Финляндия, 05.02.2020; Телефонное интервью с Юккой-Пеккой Партаненом, 21.02.2020; KAMK University of Applied Sciences, Data Center Specialization. URL: <https://www.kamk.fi/en/KAMK/Schools-at-KAMK/School-of-Information-Systems/Data-Center-Specialization> (дата обращения: 14.04.2020); KAJAK DC. URL: https://kajakdc.fi/?page_id=772&lang=en (дата обращения: 14.04.2020); KAMK University of Applied Sciences, CSC ja KAMK käynnistävät Data-analytiikan kiihdyttämön Kainuussa. URL: <https://www.kamk.fi/news/CSC-ja-KAMK-kaynnistavat-Data-analytiikan-kiihdyttamon-Kainuussa/hh0ylnqe/e80efd92-c4cc-49e6-8168-5b7e9e0ea1cf> (дата обращения: 14.04.2020); CSC, News. URL: <https://www.csc.fi/en/-/one-of-the-most-competitive-supercomputers-in-the-world-to-be-placed-in-kajaani-finla-1> (дата обращения: 14.04.2020); Granlund, Environmentally friendly cooling for a supercomputer. URL: <https://www.granlundgroup.com/finland/news/environmentally-friendly-cooling-for-a-supercomputer/> (дата обращения: 14.04.2020).

Арктическом университете Норвегии³⁹, респонденты, представляющие частные предприятия, отметили, что некоторые из арктических университетов, у которых были возможности для развития образования, связанного с центрами обработки данных, не смогли этого сделать из-за отсутствия проницательности и инициативности. В то же время индустрия информационных центров определила, а ассоциации национальных центров данных в Швеции, Финляндии и Дании подчеркнули важность образования и профессиональной подготовки в своей деятельности. Практические методы достижения поставленных целей варьируются от семинаров, в которых студенты могут принимать непосредственное участие, до сетевой кооперации, обмена знаниями и сотрудничества с государственным сектором и высшими учебными заведениями⁴⁰.

Заключение

В настоящее время большинство кластеров центров обработки данных, использующих холодный климат, расположены на окраинах Арктики или в субарктических регионах. В России, например, индустрия центров обработки данных существенно сконцентрирована как с точки зрения доли рынка (на долю трёх крупнейших компаний приходится 42% рынка), так и с точки зрения пространственного распределения с предпочтением южных регионов (65–70% всех центров обработки данных находятся в Москве, а ещё 15–18% — в Санкт-Петербурге). Вместе с тем российский рынок развивается быстрыми темпами, и ожидается, что его рост будет происходить за пределами традиционных целевых регионов. Таким образом, периферийные районы России, в некоторых из которых уже ведётся крупномасштабная деятельность по добыче криптовалюты, которые могут предложить как холодные климатические условия, так и один из самых дешёвых видов электроэнергии в мире, также могут быть потенциальными местоположениями для центров обработки данных⁴¹. Между тем, Торонто, Монреаль и Ванкувер доминируют на рынках центров обработки данных в Канаде⁴². Однако проекты прокладки подводных оптоволоконных кабелей, в первую очередь это проект Arctic Connect и располагающийся на Аляске проект компании Quintillion, наце-

³⁹ HPC Wire, UiT Recycles Supercomputing Power with Asetek's RackCDU. URL: <https://www.hpcwire.com/2014/06/23/uit-recycles-supercomputing-power-aseteks-rackcdu/> (дата обращения: 14.04.2020).

⁴⁰ Swedish Datacenter Industry. URL: <https://sdia.se/about/> (accessed 14.04.2020); Finnish Data Center Forum. URL: <https://www.fdcf.fi/> (дата обращения: 14.04.2020); Danish Data Center Industry, Skills & Education. URL: <https://datacenterindustrien.dk/focusareas/skillsandeducationworkinggroup/> (дата обращения: 14.04.2020).

⁴¹ Moss S. Rostelecom opens a data center next to a nuclear power plant, could be Russia's largest in 2021. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/rostelecom-opens-data-center-next-nuclear-power-plant-could-be-russias-largest-2021/> (дата обращения: 14.04.2020); Willner G. Why the Russian Data Center Market Is the Next Frontier. URL: <https://www.datacenterknowledge.com/industry-perspectives/why-russian-data-center-market-next-frontier> (дата обращения: 14.04.2020); Baydakova A. Bitcoin Mining Farms Are Flourishing on the Ruins of Soviet Industry in Siberia. URL: <https://www.coindesk.com/bitcoin-mining-farms-are-flourishing-on-the-ruins-of-soviet-industry-in-siberia> (дата обращения: 14.04.2020); Fedorinova Y., Atkinson G. Russia's Largest Bitcoin Mine Turns Water into Cash. URL: <https://www.bloomberg.com/news/features/2019-11-24/seo-inside-russia-s-largest-bitcoin-mine> (дата обращения: 13.04.2020).

⁴² Data Center Map. URL: <https://www.datacentermap.com/> (дата обращения: 14.04.2020).

ленные на улучшение международной связи в Арктике, могут, однако, изменить эту ситуацию в будущем. В планах регионального развития Аляски говорится о важности улучшения коммуникационных возможностей, и такие города, как Рованиеми и Киркенес, инвестировали в проект Arctic Connect, реализация которого, как ожидается, принесёт инвестиции в центры обработки данных. Оптоволоконные кабели составляют основу международной связи, и запланированные проекты, безусловно, приведут к огромным изменениям в стратегическом положении арктических регионов в рамках глобального потока информации [29, Saunavaara J.]. Вместе с тем они не будут единственным фактором, учитываемым компаниями, которые выбирают места для размещения новых центров хранения и обработки данных.

Многие из арктических и северных регионов, в которых вскоре проблемы с международной связью будут решены, также испытывают нехватку человеческого капитала и региональных навыков, которые представляют собой факторы, существенно влияющие на выбор площадки для размещения и возможного развития кластера центров обработки данных. Поэтому, несмотря на межотраслевую мобильность работников, которая может помочь регионам, в которых осуществляются другие виды промышленной деятельности, могут потребоваться новые инвестиции в научные исследования и образование. В противном случае квалифицированных рабочих придётся нанимать для работы в северные общины из других мест. Это может привести к проблемам с набором персонала, созданию различных видов стимулов, способствующих увеличению расходов на персонал и ставящих под сомнение конкурентоспособность удалённых регионов, а также к неразвитости региональных сетей знаний, важных для формирования кластера.

Стоит также подчеркнуть, что бизнес, ориентированный на центры обработки данных, нацелен на получение максимальной прибыли. Таким образом, стимулы, влияющие на окупаемость инвестиций, общую стоимость собственности в результате создания центров, а также долгосрочные эксплуатационные расходы, влияют на решения о размещении. В то время как национальные правила, касающиеся размера налога на энергию, уплачиваемого центрами обработки данных, играли значительную роль в странах Северной Европы, определяя их привлекательность в сравнении друг с другом, конкуренция между штатами и округами в Соединённых Штатах привела к появлению щедрых стимулов и агрессивной рекламной деятельности. В связи с этим, компании, работающие с центрами обработки данных, могут подбирать подходящую хостинговую компанию в США. Однако законодательство ЕС ограничивает возможность подобной деятельности в Европе⁴³. Несмотря на конкурентный характер бизнеса, трансграничное исследовательское сотрудничество, которое уже имело место в странах Северной Европы, могло бы помочь небольшим арктическим и северным региональным и национальным экономикам в конкуренции с Франкфуртом, Лондоном, Ам-

⁴³ Интервью с Петри Хююппя, Оулу, Финляндия, 05.02 2020; Интервью с Суви Линден, Оулу, Финляндия, 6.02.2020; State of Washington Department of Commerce. State of Data Center Industry: An analysis of Washington's Competitiveness in This Fast-Growing High-Tech Field. Report to the Legislature, январь 2018.

стердамом, Парижем и Дублином, в которых по-прежнему размещается подавляющее большинство центров обработки данных в Европе.

Быстрый рост индустрии центров обработки данных уже вызвал ответную реакцию в некоторых ключевых регионах Центральной Европы. Амстердам, например, временно запретил строительство новых центров обработки данных, а другие места, такие как Стокгольм, сталкиваются с проблемами, связанными с пропускной способностью своих сетей. Хотя развитие такого рода может укрепить позиции богатых энергоресурсами северных регионов, неудачи или значительные задержки в реализации предыдущих крупномасштабных проектов центров обработки данных, получивших широкую огласку, такие как Центр обработки данных Kolos в Баллангене, Норвегия, и гигантские планы Silent Partner Group, включающие три объекта в северной Финляндии ⁴⁴, могут вызвать подозрение к отрасли у местных жителей и административных лиц. Кроме того, решения относительно инвестиций всегда принимаются людьми. Кен Бодри использовал термин «держатели серверов», когда говорил о бизнес-руководителях, которые хотели бы разместить своё ИТ-оборудование в непосредственной близости, несмотря на то, что они расположены в районах, подверженных серьёзным природным рискам [30, Vaudry K., с. 99]. Таким образом, можно утверждать, что будущее развитие бизнеса центров обработки данных в Арктике и на Севере не только связано с измеримыми техническими, экономическими или экологическими параметрами, но также зависит от человеческого восприятия и отношения.

Изучая роль, которую центры обработки данных могут играть в продвижении экологических информационных технологий (ИТ), Сантханам и Келлер провели обзор литературы, изучая рецензируемые журнальные статьи и доклады конференций в базе данных Scopus. Они определили пять основных элементов структуры, описывающей роль центров обработки данных в экологических ИТ:

- экономия энергии,
- экономия затрат,
- устойчивость и экологически чистая энергия,
- информационные технологии для экологизации центров обработки данных и
- согласование требований бизнеса с использованием ресурсов [31, Santhanam A., Keller C.].

Все эти особенности также присутствуют в НИОКР в Арктике и на Севере. Тем не менее, результаты настоящей работы подтверждают идею того, что исследования, связанные с

⁴⁴ BBC, Record-sized data centre planned inside Arctic Circle. URL: <https://www.bbc.com/news/technology-40922048> (дата обращения: 14.04.2020); Smolaks M. Kolos data center park in Norway is being acquired by cryptocurrency miners. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/kolos-data-center-park-in-norway-is-being-acquired-by-cryptocurrency-miners/> (дата обращения: 14.04.2020); Opiah A. Silent Partner Group To Build Up Four Hyperscale Data Centre Hubs in Finland. URL: <https://data-economy.com/silent-partner-group-to-build-up-four-hyperscale-data-centre-hubs-in-finland/> (дата обращения: 14.04.2020); YLE. URL: <https://yle.fi/uutiset/3-10492984> (дата обращения: 14.04.2020).

энергосбережением, были сосредоточены на энергоэффективности и охлаждении, и, таким образом, интерес к возобновляемым источникам энергии и повторному использованию тепла может быть определён как особенность, которая характерна для северных, в особенности скандинавских, исследований центров обработки данных. Помимо научных публикаций, аналогичные тенденции можно отметить в научно-исследовательской деятельности частных компаний и организаций, объединяющих участников, вовлечённых в индустрию центров обработки данных.

Концепция экологичных ИТ, которая, согласно одному из определений, «обозначает все виды деятельности и усилия, включающие экологически безопасные технологии и процессы во весь жизненный цикл информационных и коммуникационных технологий» [32, Hedwig M., Malkowski S., Neumann D., с. 2], основана на долгосрочных вопросах, касающихся устойчивого развития и фактических выбросов диоксида углерода центрами обработки данных. Хотя вопросы, связанные с энергетикой, играют важную роль, они являются лишь частью общего процесса, включающего также материалы, используемые как на этапе строительства, так и на этапе эксплуатации. Обсуждения, касающиеся эффективности, стоимости и экологичности материалов, актуальны на всех уровнях, будь то материалы для компьютерных компонентов или материалы, которые будут использоваться при проектировке и строительстве зданий центров обработки данных. В этом отношении следует упомянуть деревянный центр обработки данных, построенный в Швеции⁴⁵, поскольку он является примером сотрудничества между развивающейся отраслью центров обработки данных и более традиционными отраслями, использующими северные природные ресурсы.

Наконец, чтобы придать смысл дискуссии об устойчивости центров обработки данных и энергопотреблении, следует подчеркнуть, что центры обработки данных созданы для удовлетворения спроса, возникающего ввиду роста других предприятий, использующих их услуги. Серверы никогда не запускаются (и не потребляют энергию) без причины. Хотя давление со стороны законодательства и потребителей, скорее всего, подтолкнёт центры обработки данных к более устойчивому функционированию в будущем, инициативы, реализованные в отрасли, уже сделали ситуацию намного лучше, чем она была, например, в конце 1990-х гг. В то время статья, опубликованная в *Forbes* под названием “Dig more coal — the PC’s are coming” («Копайте больше угля — скоро появятся компьютеры»), открыла многим людям глаза на связь между электронным оборудованием и потреблением энергии⁴⁶. Тем не менее, индустрия центров обработки данных не застрахована от расхождений в понимании значений «устойчивый» или «экологичный», а также от различий между арктическими и северными странами, которые тоже влияют на условия работы других отраслей. Следователь-

⁴⁵ Data Economy, Wood You Believe It! A Data Centre Made Of Wood. URL: <https://data-economy.com/wood-you-believe-it-a-data-centre-made-of-wood/> (дата обращения: 14.04.2020).

⁴⁶ Huber P., Mills M. Dig more coal — the PC’s are coming. URL: <https://www.forbes.com/forbes/1999/0531/6311070a.html#4b8baf822580> (дата обращения: 14.04.2020).

но, давление и методы, используемые для достижения большей энергоэффективности, скорее всего, будут и дальше изменяться в будущем, и будут существовать различные мнения, например, относительно совместного развития ядерной энергетики и центров обработки данных⁴⁷.

References

1. Varnelis K. Eyes That Do Not See: Tracking the Self in the Age of the Data Center. *Harvard Design Magazine*, 2014, no. 38.
2. Dawkins C. Regional Development Theory: Conceptual Foundations, Classic Works, and Recent Developments. *Journal of Planning Literature*, 2003, no. 18 (2), pp. 131–172.
3. Piperopolous P.G. *Entrepreneurship, Innovation and Business Clusters*. Farnham, Gower Publishing Limited, 2021.
4. Wolfe D.A. The Role of Universities in Regional Development and Cluster Formation. In: G. Jones, P. McCarney, M. Skolnik, eds. *Creating Knowledge, Strengthening Nations: The Changing role of Higher Education*. Toronto, University of Toronto Press, 2005, pp. 167–194.
5. Bristow G., Healey A. Innovation and Regional Economic Resilience: An Exploratory Analysis. *The Annals of Regional Science*, 2018, no. 60, pp. 265–284.
6. Vonderau A. Scaling the Cloud: Making State and Infrastructure in Sweden. *Ethnos. Journal of Anthropology*, 2019, vol. 84, pp. 698–718.
7. Hogan M., Vonderau A. The Nature of Data Centers. *Culture Machine*, 2019, vol. 18.
8. Masanet E., Shehabi A., Lei N., Smith S., Koomey J. Recalibrating Global Data Center Energy-Use Estimates. *Science*, 2018, Col 367 (6481), pp. 984–986.
9. Peuhkuri M., Lääkkölä R., Costa-Requena J., Manner J. Datacenters — Energy Hogs or Helping to Optimize Energy Consumption. *IEEE, 2012 International Conference on Smart Grid Technology, Economics and Policies (SG-TEP)*, 2012, pp. 1–4. DOI: 10.1109/SG-TEP.2012.6642387.
10. Lundmark M., Power D. Labour Market Dynamics and the Development of the ICT Cluster in the Stockholm Region. Centre for Research on Innovation and Industrial Dynamics. *Research Paper 2007*, no. 1, pp. 1–24.
11. Simonen J., Svento R., Karhinen S., McCann P. Inter-Regional and Inter-Sectoral Labour Mobility and the Industry Life Cycle: A Panel Data Analysis of Finnish High Technology Sector. In: B. Biagi, A. Faggian, I. Rajbhandari, V.A. Venhorst, eds. *New Frontiers in Interregional Migration Research*. Cham, Springer, 2018, pp. 151–179.
12. Wahlroos M., Pärssinen M., Rinne S., Syri S., Manner J. Future Views on Waste Heat Utilization — Case of Data Centers in Northern Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, no. 82, pp. 1749–1764.
13. Lu T., Lu X., Remes M., Viljanen M. Investigation of Air Management and Energy Performance in a Data Center in Finland: Case Study. *Energy and Buildings*, 2011, no. 43, pp. 3360–3372.
14. Saunavaara J. The Changing Arctic & the Development of Hokkaido. *Arctic Yearbook*, 2017, pp. 326–338.
15. Patterson M.K., VanGeet O., Tschudi W., Azevedo D. Towards the Net-Zero Data Center: Development and Application of an Energy Reuse Metric. *ASHRAE Transaction*, 2011, vol. 177 (2), pp. 10–17.
16. Marcinichen J.B., Oliver J.A., Thome J.R. On-chip Two-Phase Cooling of Datacenters: Cooling System and Energy Recovery Evaluation. *Applied Thermal Engineering*, 2012, vol. 41, pp. 36–51.
17. Ebrahimi K., Jones G.F., Fleischer A.S. A Review of Data Center Cooling Technology, Operating Conditions and the Corresponding Low-Grade Waste Heat Recovery Opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, no. 31, pp. 622–638.

⁴⁷ Пример: Moss S. Rostelecom opens a data center next to a nuclear power plant, could be Russia's largest in 2021. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/rostelecom-opens-data-center-next-nuclear-power-plant-could-be-russias-largest-2021/> (дата обращения: 14.04.2020).

18. Ebrahimi K., Jones G.F., Fleischer A.S. Thermo-Economic Analysis of Steady State Waste Heat Recovery in Data Centers Using Absorption Refrigeration. *Applied Energy*, 2015, vol. 139, pp. 384–397.
19. Davies F. F., Maidment G.G., Tozer R.M. Using Data Centres for Combined Heating and Cooling: an Investigation for London. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 94, pp. 296–304.
20. Wahlroos M., Pärssinen M., Manner J., Syri S. Utilizing Data Center Waste Heat in District Heating — Impacts on Energy Efficiency and Prospects for Low-Temperature District Heating Networks. *Energy*, 2017, vol. 140 (1), pp. 1228–1238.
21. Pärssinen M., Wahlroos M., Syri S., Manner J. Waste Heat from Data Centers: An Investment Analysis. *Sustainable Cities and Society*, 2019, vol. 44, pp. 428–444.
22. Ghatikar G., Piette M.A., Venkata Ganti V. Smart Grid-Responsive Data Centers. In: H. Geng, ed. *Data Center Handbook*. New Jersey, Wiley, 2015, pp. 577–592.
23. Nguyen K.K., Cheriet M., Lemay M., Reijs V., Mackarel A., Pastrama A. Environmental-aware Virtual Data Center Network. *Computer Networks*, vol. 56, pp. 2538–2550.
24. AlLee G. Green Microprocessor and Server Design. In: H. Geng, ed. *Data Center Handbook*. New Jersey, Wiley, 2015, pp. 401–418.
25. Vonderau A. Technologies of Imagination: Locating the Cloud in Sweden’s North. *Imaginations*, 2017, no. 8–2.
26. Johnson A. Data Centers as Infrastructural In-betweens: Expanding Connections and Enduring Marginalities in Iceland. *American Ethnologist*, 2019, vol. 46 (1), pp. 75–88.
27. Johnson A. Emplacing Data Within Imperial Histories: Imagining Iceland as Data Center’ ‘Natural’ Home. *Culture Machine*, 2019, vol. 18.
28. Maguire J., Winthereik B.R. Digitalising the State Data Centres and the Power of Exchange. *Ethnos. Journal of Anthropology*, 2019. DOI: 10.1080/00141844.2019.1660391
29. Saunavaara J. Connecting the Arctic While Installing Submarine Data Cables Between East Asia, North America and Europe. In: K. Hossain, M. Salminen, G.P. Zojer, eds. *Digitalisation and Human Security — A Multi-Disciplinary Approach to Cybersecurity in the European High North*. Cham, Macmillan, 2020, pp. 205–227.
30. Baudry K. Data Center Site Search and Selection. In: H. Geng, ed. *Data Center Handbook*. New Jersey, Wiley, 2015, pp. 89–102.
31. Santhanam A., Keller C. Green Data Centers: The Role of Data Centers in Advancing Green IT: A Literature Review. *Journal of Soft Computing and Decision Support system*, 2018, vol. 5 (1), pp. 9–26.
32. Hedwig M., Malkowski S., Neumann D. Taming Energy Costs of Large Enterprise Systems through Adaptive Provisioning. *ICIS 2009 Proceedings*, 2009, 17 p.

Статья принята 14.10.2020.