



УДК 38, 502/504

DOI: <http://dx.doi.org/10.21686/2500-3925-2024-4-27-34>Центральный экономико-математический институт (ЦЭМИ) РАН,
Москва, Россия

М.Г. Дубинина

Экологический след и цифровые технологии в странах Азии

Цель исследования заключается в выявлении влияния информационно-коммуникационных технологий и мер, предпринимаемых телекоммуникационными компаниями Китая, Японии и Южной Кореи, на состояние окружающей среды этих стран.

Материалы и методы. В качестве меры оценки состояния окружающей среды используются показатели экологического следа (на основании данных Global Footprint Network) и выбросов парниковых газов (по данным International Energy Agency) для этих стран. На основании отчетов об устойчивом развитии (Sustainability Reports) телекоммуникационных компаний этих стран (China Mobile, SK Telekom, KDDI и других) рассматриваются их стратегии в области охраны окружающей среды и достижения нулевого углеродного следа. Влияние информационно-коммуникационных технологий оценивается с помощью показателей количества пользователей интернета, фиксированного доступа в интернет, пользователей мобильной связи на 100 человек населения страны, доли ИКТ-товаров и услуг в общем количестве экспорта и импорта стран, а также индекса роста ИТ-инвестиций в частном секторе для Японии. Для каждой страны построена корреляционная матрица зависимости уровня логарифма экологического следа (Y) от логарифмов перечисленных показателей, выбраны факторы, в наибольшей степени влияющие на Y и не являющиеся мультиколлинеарными. По отобранным показателям построены модели множественной регрессии для каждой страны и оценены их параметры.

Результаты. Для Китая и Южной Кореи получена положительная эластичность экологического следа от количества пользователей мобильной связи (для Китая) и фиксированного широкополосного доступа в интернет (для Южной Кореи). Кроме того, импорт ИКТ-товаров в страну снижает ее экологический след, а экспорт ИКТ-услуг из страны ведет к росту показателя. Для Японии получены отрицательные эластичности показателей сектора ИКТ для экологического следа страны, что связано с предпринимаемыми телекоммуникационными компаниями мерами по снижению собственного потребления электроэнергии и других ресурсов, а также широким использованием возможностей цифровых технологий для энергосбережения в других секторах экономики Японии.

Заключение. Для Китая и Южной Кореи получились значимые зависимости экологического следа страны от распространения цифровых технологий, и их диффузия влечет за собой увеличение показателя. Пока это влияние не очень велико, но следует учесть широкое распространение мобильной связи 5G в этих странах, что может существенно увеличить долю сектора ИКТ в экологическом следе стран. В то же время телекоммуникационные компании Японии содействуют защите окружающей среды.

Ключевые слова: информационно-коммуникационные технологии, телекоммуникационные компании, экологический след, выбросы парникового газа, 5G.

Marina G. Dubinina

Central Economic and Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Ecological Footprint and Digital Technologies in Asian Countries

The purpose of the study is to identify the impact of information and communication technologies and measures taken by telecommunications companies in China, Japan and South Korea on the environment of these countries.

Materials and methods. Indexes of the ecological footprint (based on the Global Footprint Network data) and greenhouse gas emissions (based on the International Energy Agency data) for these countries are used as a measure of environmental assessment. Based on the Sustainability Reports of telecommunication companies in these countries (China Mobile, SK Telekom, KDDI and others), their strategies for environmental protection and achieving a zero carbon footprint are examined. The impact of information and communication technologies is assessed using indexes of the number of Internet users, fixed Internet access, mobile communications users per 100 people of the country's population, the share of ICT goods and services in the total exports and imports of countries, as well as the growth index of IT investments in the private sector for Japan. For each country, a correlation matrix was constructed depending on the level of the logarithm of the ecological footprint (Y) on the logarithms of the listed indexes; the factors that most influence Y and are not multicollinear were selected. Based on the selected indexes, multiple regression models were developed for each country and their parameters were assessed.

Results. For China and South Korea, a positive elasticity of the ecological footprint was obtained for the number of mobile phone users (for China) and fixed broadband Internet access (for South Korea). In addition, the import of ICT goods into a country reduces its environmental footprint, and the export of ICT services from the country leads to an increase in the index. For Japan, negative elasticities of the ICT sector indexes for the country's ecological footprint were obtained, which is associated with measures taken by telecommunication companies to reduce their own consumption of electricity and other resources, as well as the widespread use of digital technologies for energy saving in other sectors of the Japanese economy.

Conclusion. For China and South Korea, significant dependences of the country's ecological footprint on the spread of digital technologies were obtained, and their diffusion entails an increase in the index. While this impact is not very large, the widespread adoption of 5G mobile communications in these countries should be taken into account, which could significantly increase the share of the ICT sector in the countries' environmental footprint. At the same time, Japanese telecommunication companies are promoting environmental protection.

Keywords: information and communication technologies, telecommunication companies, ecological footprint, greenhouse gas emissions, 5G.

Введение

Проблемы охраны окружающей среды в настоящее время стоят как никогда остро. Одним из индикаторов, отражающих меру потребления человечеством ресурсов и услуг биосферы, является показатель экологического следа (Ecological Footprint, EF), который позволяет соотнести потребление этих ресурсов со способностью Земли к их воспроизводству — биоемкостью планеты [1]. EF измеряет природные ресурсы, которые потребляются людьми в ходе ведения лесного и сельского хозяйства, рыболовства, добычи полезных ископаемых и промышленного производства, и выражается в глобальных гектарах (га). Экологический след обычно используется вместе с другим показателем — биоемкостью — для создания системы экологического учета, основанной на спросе и предложении. Предложение природных ресурсов (биоемкость) сравнивается со спросом на эти ресурсы (след), чтобы определить, способна ли окружающая среда поддерживать текущий уровень потребления ресурсов [2].

На рис. 1 представлено, как эти показатели соотносились

на мировом уровне за последние несколько десятилетий.

За рассматриваемые 60 лет биоемкость планеты сократилась в 3 раза, а экологический след превышает показатель биоемкости уже с начала 1970-х гг. Это означает, что используется больше экологических ресурсов, чем природа способна восстановить.

Одной из составляющих экологического следа является «углеродный след», оценивающий общее количество выбросов парниковых газов, которые прямо или косвенно вызваны результатом деятельности или накапливаются на этапах жизненного цикла продукта [4]. Углеродный след является наиболее быстрорастущим компонентом экологического следа; если в 1961 г. он составлял 44%, то в 2014 г. — 60% общего мирового экологического следа [5]. В целом в мире в 2020 г. более 32% выбросов парниковых газов приходилось на производство электроэнергии, 15,5% — на транспорт, 13,2% — на обрабатывающую промышленность и строительство, 12,5% — на сельское хозяйство [6]. В странах ЕС большая часть выбросов парниковых газов в 2022 г. приходилась на обеспечение энергией (26,6%),

внутренние перевозки (23%) и промышленное производство (19,6%) [7].

Экологический след сектора информационно-коммуникационных технологий (ИКТ)

Влияние сектора ИКТ на EF оценивается двояко. С одной стороны, переход экономики от материального капитала к информационному помогает сохранить окружающую среду и снизить потребление энергии. ИКТ вносят позитивный вклад в устойчивое развитие за счет использования интеллектуальных сетей для производства и потребления энергии, аналитики больших данных для интеллектуальных транспортных систем, сетей и датчиков в сельском хозяйстве, электронной коммерции и цепочек поставок с повышенной эффективностью. С другой стороны, ИКТ сами являются источником дополнительного экологического следа. По данным некоторых исследований, за период 2002–2012 гг. выбросы углекислого газа от ИКТ выросли на 40% [8].

Сектор ИКТ использует два типа электронного оборудования: 1) электронные устройства и гаджеты; 2) инфраструктурные объекты (центры обработки данных, включающие серверы, сетевое оборудование, силовое и охлаждающее оборудование, сети связи и др.). Высокий спрос на цифровые коммуникации в периоды локдаунов и повсеместной удаленной работы привел к значительному росту потребления энергии. По оценкам, в 2020 г. на долю ИКТ пришлось от 1,8% до 2,8% всех выбросов парниковых газов в мире. Это больше, чем доля авиационного сектора (1,9%). Показатель экологического следа ИКТ растет не только за счет гигантского потребления электроэнергии при производстве и использовании компьютеров, но и за счет огромного

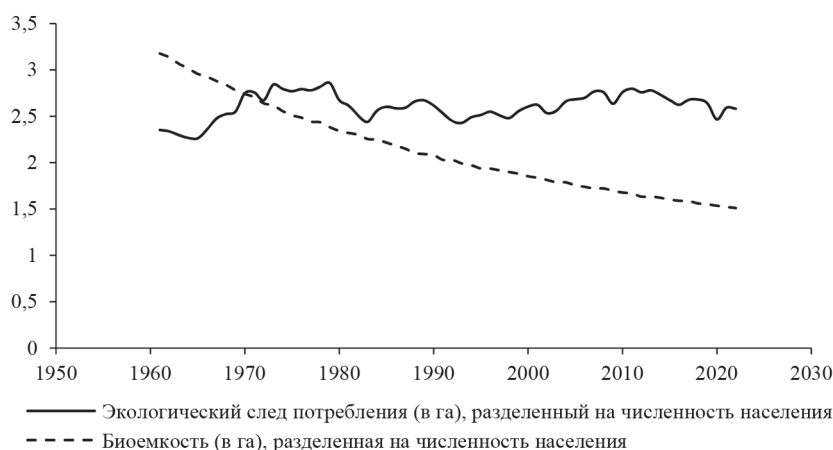


Рис. 1. Динамика показателей мирового EF и биоемкости Земли за 1961–2022 гг.

Fig. 1. Dynamics of global Ecological Footprint and Earth biocapacity indexes for 1961–2022.

Источник: [3]

Source: [3]

потребления воды в центрах обработки данных, что становится все более серьезной проблемой. Группа кембриджских ученых Nature считают, что научное сообщество должно принять немедленные меры, чтобы не допустить неконтролируемого роста компьютерных технологий и связанных с ним выбросов CO₂ [9].

Углеродный след центров обработки данных (ЦОД) является самым высоким за всю историю. Поскольку все больше и больше операций управляются в «облаке», энергия, необходимая для обработки и выполнения этих операций, генерируется в основном за счет ископаемого топлива. Данные Международного энергетического агентства (МЭА) показывают, что центры потребляют 200 ТВтч электроэнергии и производят 3,5% мировых выбросов парниковых газов [10]. Повышение эффективности и доступности ИКТ также влечет за собой рост выбросов от более активного их использования предприятиями и частными лицами.

Обзор литературы

В последние несколько лет в научной литературе воздействию ИКТ на экологический след уделяется особое внимание. Так, в работе [11] исследуется наличие перекрестной зависимости во всех странах «Большой семерки» между экологическим следом, импортом и экспортом ИКТ, экономической сложностью, экономическим ростом и другими факторами. Результаты исследования показали, что экономический рост увеличивает интенсивность экологического следа, в то время как импорт ИКТ, исследования и разработки, а также торговля помогают уменьшить экологический след в экономике этих стран.

В статье [12] исследовались причинно-следственные связи между индустриализацией, глобализацией, ИКТ и ухудше-

нием состояния окружающей среды в Малайзии в 1970–2019 гг., оцениваемым через показатели выбросов углекислого газа и экологического следа. В качестве показателей ИКТ рассматривались количество пользователей Интернета, мобильной сотовой связи и абонентов фиксированной телефонной связи. Авторами получена совместная долгосрочная и краткосрочная причинно-следственная связь между индустриализацией, глобализацией, ИКТ и выбросами углекислого газа, при этом причинно-следственная связь с экологическим следом была незначительной.

Анализ влияния электронных продуктов на экологический след в основном осуществлялся с использованием оценок их жизненного цикла. В работе [13] влияние мобильных телефонов на окружающую среду оценивалось как энергетические потребности при добыче материалов, необходимых для производства смартфонов, а также экологические нагрузки при их использовании.

В работе [14] оценивалась связь между воздействием на окружающую среду, инвестициями в ИКТ и экономическим ростом в странах Юго-Восточной Азии за 1990–2020 гг. на примере Саудовской Аравии. Авторами было получено, что ИКТ не оказывают существенного влияния на экологическую устойчивость в этой стране, что развитие цифровых технологий вполне возможно для поддержки зеленой экономики, а технологические разработки в период исследования становятся все более благоприятными для окружающей среды.

Анализ динамики экологического следа в странах Азии

Из 133 млн т CO₂ эксплуатационных выбросов, произведенных телекомму-

никационными компаниями мира в 2022 г., на долю стран Азиатско-Тихоокеанского региона пришлось 69%, при этом выбросы трех операторов из Китая составили почти 50%. Основная причина большой доли этого региона в «углеродном следе» заключается в том, что здесь находится значительная часть пользователей мобильной и фиксированной широкополосной связи при наличии электрических сетей, которые в основном работают на ископаемом топливе [15].

Для анализа влияния ИКТ на экологический след в странах Азии были выбраны Китай, Япония и Южная Корея. В этих странах особенно велика роль цифровых технологий, доля ИКТ в ВВП в них росла существенно быстрее, чем экономический рост. В 2005–2015 гг. рост ИКТ в Китае в среднем составил 13,7%, что превышает темпы экономического роста в этой стране (9,7%). В Японии рост ИКТ почти в четыре раза превысил рост ВВП [16]. В то же время эти страны отличаются между собой своей политикой по отношению к окружающей среде.

Будучи крупнейшей развивающейся страной в мире, Китай находится в эпицентре глобальных экологических проблем. Быстрый экономический рост страны (ее ВВП на душу населения вырос с 905 долл. в 1990 г. до более чем 11,56 тыс. долл. в 2022 г. в ценах 2015 г.), а также ее населения (плотность которого выросла со 120,9 до 150,4 человек на кв. км за тот же период [17]) являются причиной огромных масштабов спроса Китая на природные ресурсы. Урбанизация и изменения образа жизни приводят к экспоненциальному увеличению спроса на товары и услуги в стране. За период 1990–2022 гг. ее экологический след на душу населения увеличился более чем в 3,6 раза (рис. 2).

В то же время государственная политика в Южной Корее является одним из ключевых механизмов сокращения экологического следа, где тремя основными компонентами являются инвестиции и инфраструктура (24%), продовольствие (23%) и мобильность (19%), на которые в совокупности приходится 70% экологического следа Кореи. Государственные и капитальные инвестиции в инфраструктуру (строительство зданий, дорог, заводов и оборудования — 24%) и расходные материалы, закупаемые государством (школьные принадлежности в государственных школах, офисное и административное оборудование — 6%) составляют остальную часть экологического следа. Решения государственной политики, принимаемые правительством, имеют большое влияние на строительство городской и инфраструктуры, что, в свою очередь, сильно влияет на долгосрочные модели потребления корейцев. Основным компонент следа мобильности Кореи — это углеродный след (90%) [18].

В Японии, как и в Южной Корее, уделяется большое внимание сокращению выбросов в атмосферу на правительственном уровне. Экологический след Японии за период 1990–2022 гг. практически не изменился. При этом в 2020 г. наблюдалось его снижение относительно уровня 1990 г.

Как говорилось выше, выбросы парниковых газов или углеродный след составляют большую часть экологического следа. В трех странах наибольшая доля выбросов в 2021 г. приходилась на производство электроэнергии и тепла (табл. 1), на втором месте в Китае было промышленное производство, в Японии и Южной Корее — транспорт.

В этом списке нет сектора ИКТ, однако его вклад в рост углеродного следа в последние

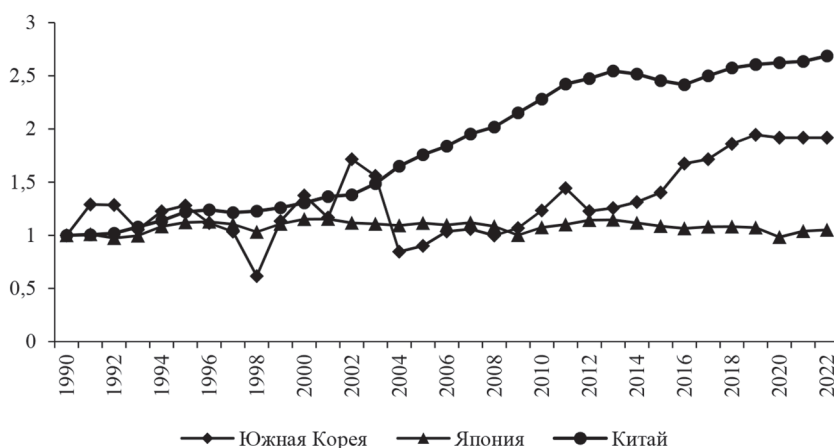


Рис. 2. Индекс роста экологического следа Южной Кореи, Японии и Китая за период 1990–2022 гг. (1990 = 1, рассчитано по данным [3]).

Fig. 2. Ecological Footprint Growth Index of South Korea, Japan and China for the period 1990–2022 (1990 = 1, calculated according to data [3]).

Таблица 1 (Table 1)

Структура выбросов парниковых газов по секторам экономики стран в 2021 г., %

Structure of greenhouse gas emissions by economic sectors of countries in 2021, %

Сектор экономики	Япония	Южная Корея	Китай
Производство электроэнергии и тепла	48,28	52,95	55,81
Промышленность	18,20	11,67	26,60
Транспорт	18,36	18,48	9,10
Жилищное строительство	5,13	5,69	3,13
Коммерческие и государственные услуги	5,00	2,64	1,05
Сельское хозяйство	0,86	0,24	0,93
Конечное потребление, не указанное ранее	0,23	0,43	0,44
Другие отрасли	3,94	7,89	2,93
Всего	100,00	100	100

Источник: рассчитано по данным [19]

Source: calculated based on data [19]

годы заметно увеличился. По данным [20], в 2020 г. на его долю приходилось примерно 4–6% потребляемой электроэнергии в мире. С вводом в коммерческую эксплуатацию мобильных сетей 5G многие исследователи начали изучать влияние этого поколения мобильной связи на экологию. Отчеты разных организаций предупреждают, что технология 5G приведет к значительному увеличению углеродного следа цифровых технологий. Прогнозируется, что к 2030 г. в сетях 5G произойдет резкое увеличение требований к мощности из-за широкого внедрения безлимитной подписки на данные для пользователей 5G, виртуальной реальности и

мобильных игр, что приведет к постоянно растущему уровню трафика данных. В Китае ежемесячный мобильный трафик данных на 1 пользователя за период 2015–2022 гг. вырос в 32,5 раза, в Южной Корее — более чем в 5 раз, в Японии — в 2,6 раза (табл. 2)

Моделирование зависимости EF от показателей ИКТ

Для Китая, Японии и Южной Кореи было исследовано влияние показателей развития ИКТ на экологический след стран. В качестве показателей ИКТ рассматривались следующие: количество пользователей мобильной связи на 100 человек населения страны; количе-

Таблица 2 (Table 2)

Индексы роста ежемесячного трафика мобильного широкополосного доступа в Интернет на одну подписку, 2015 г.=1.

Growth indexes of monthly mobile broadband Internet access traffic per subscription, 2015 = 1

Годы	Китай	Япония	Южная Корея
2015	1	1	1
2016	1,8	1,1	1,4
2017	3,9	1,1	1,9
2018	9,9	1,3	2,3
2019	16,4	1,6	3,0
2020	22,6	1,8	3,8
2021	28,5	2,2	4,4
2022	32,5	2,6	5,1

Источник: рассчитано по данным ITU [21]

Source: calculated based on ITU data [21]

Таблица 3 (Table 3)

Коэффициенты корреляции между логарифмами показателя экологического следа и показателями развития ИКТ для Китая, Японии и Южной Кореи за период 1990–2022 гг. (рассчитано на основании данных [3, 17])

Correlation coefficients between logarithms of the ecological footprint index and ICT development indexes for China, Japan and South Korea for the period 1990–2022 (calculated based on data [3, 17])

Показатель ИКТ	Китай	Япония	Южная Корея
Количество пользователей мобильной связи на 100 человек населения страны	0,891	-0,604	0,301
Количество пользователей фиксированного широкополосного доступа в интернет на 100 человек населения страны	0,909	-0,603	0,577
Количество пользователей интернета на 100 человек населения страны	0,875	-0,549	0,302
Доля экспорта ИКТ-услуг в общем объеме импорта услуг, %	0,786	-0,175	0,624
Доля экспорта ИКТ-товаров в общем объеме экспорта товаров, %	0,430	0,818	0,097
Доля импорта ИКТ-товаров в общем объеме импорта товаров, %	-0,142	0,273	0,289

ство пользователей интернета на 100 человек населения; количество пользователей фиксированного широкополосного доступа в интернет на 100 человек населения страны; доля экспорта ИКТ-товаров в общем экспорте товаров страны, %; доля импорта ИКТ-товаров в общем импорте товаров, %; доля экспорта ИКТ-услуг в общем экспорте услуг, %. Полученные коэффициенты корреляции между экологическим следом и показателями развития ИКТ по странам представлены в табл. 3.

Показатели количества пользователей ИКТ в Китае

имеют высокие положительные коэффициенты корреляции с показателем экологического следа на душу населения страны, тогда как в Южной Корее наиболее высока корреляционная связь показателя экологического следа с долей экспорта ИКТ-услуг. В Японии наблюдается значимая отрицательная корреляция между логарифмом EF и логарифмом количества пользователей ИКТ, положительная корреляция выявлена для доли экспорта ИКТ-товаров. На основании корреляционных матриц для каждой страны выбраны показатели сектора

ИКТ, имеющие наибольшую корреляцию с EF и не имеющие высокой корреляционной зависимости с другими показателями.

Для *Китая* была построена модель вида:

$$\ln(EF) = a_0 + a_1 * \ln(X_1) + a_2 * \ln(X_2),$$

где EF — экологический след страны на душу населения;

X_1 — количество пользователей мобильной связи на 100 человек населения страны;

X_2 — доля импорта ИКТ-товаров в общем объеме импорта товаров, %.

Оценка параметров модели за период 2000–2022 гг. дала следующие результаты (в скобках указаны t -статистики): $a_0 = 0,853$ (3,6), $a_1 = 0,281$ (32,9), $a_2 = -0,30$ (-4,0), $R^2 = 0,98$. Таким образом, увеличение количества пользователей мобильной связи на 1% увеличивает экологический след потребления Китая на 0,281%, а рост импорта ИКТ-товаров на 1% снижает его на 0,3% (на импортируемые товары не расходуются собственные материальные ресурсы).

Для *Южной Кореи* исследовалась зависимость следующего вида:

$$\ln(EF) = b_0 + b_1 * \ln(X_3) + b_2 * \ln(X_4),$$

где X_3 — количество пользователей фиксированного широкополосного доступа в интернет на 100 человек населения страны,

X_4 — доля экспорта ИКТ-услуг в общем объеме импорта услуг, %.

Оценка параметров модели за период 1998–2022 гг. дала следующие результаты: $b_0 = -2,38$ (-28,2), $b_1 = 0,081$ (3,2), $b_2 = 0,164$ (3,9), $R^2 = 0,61$. Таким образом, выявлена положительная эластичность экологического следа от количества пользователей фиксированной широкополосной связи и от доли экспорта ИКТ-услуг. При увеличении количества

пользователей фиксированного широкополосного доступа в интернет на 1% экологический след возрастает на 0,08%, а при росте доли экспорта ИКТ-услуг на 1% — на 0,16%.

Для Японии исследовалась зависимость логарифма показателя экологического следа вида:

$$\ln(EF) = c_0 + c_1 * \ln(X_1) + c_2 * \ln(X_6),$$

где X_6 — индекс роста ИТ-инвестиций в частном секторе (1995 г. = 100%).

За период 2000–2022 гг. были получены следующие оценки параметров модели: $c_0 = 3,6$ (8,3), $c_1 = -0,177$ (-4,3), $c_2 = -0,239$ (-2,1), $R^2 = 0,87$. Таким образом, показатели сектора ИКТ для Японии имеют отрицательные эластичности для экологического следа страны. С ростом количества пользователей мобильной связи на 1% экологический след Японии снижается на 0,18%, а при увеличении индекса роста ИТ-инвестиций в частном секторе на 1% — EF снижается на 0,24%.

Это может быть отражением тех усилий, которые операторы сотовой связи Японии прилагают к охране окружающей среды. Так, в июне 2023 г.

компания KDDI запустила в работу «устойчивые базовые станции» (sustainable base stations), оснащенные оборудованием, которое способствует углеродной нейтральности [22]. В компании Softbank в 2022 г. 42,8% используемой энергии приходилась на возобновляемые источники энергии, а интенсивность выбросов парниковых газов снизилась в 2,7 раза по сравнению с 2018 г. (с 682 т на Гб/сек в 2018 г. до 249 т Гб/сек в 2022 г.) [23]. Компания NTT занимается исследованиями и разработками экологически чистых технологий разработки и эксплуатации программного обеспечения для декарбонизации этого сектора ИКТ. В целом, японские экологически чистые решения в области ИКТ и искусственного интеллекта служат важной движущей силой в экологической трансформации страны.

Заключение

Для Китая и Южной Кореи получились значимые зависимости экологического следа страны от распространения цифровых технологий. И их диффузия влечет за собой увеличение показателя EF. Пока

это влияние не очень велико, но следует учесть также широкое распространение мобильной связи 5-го поколения в этих странах. На конец 2023 г. количество пользователей 5G составило в Китае почти 1,4 млрд человек, а количество базовых станций 5G достигло 3,4 млн единиц [24]. В Южной Корее количество пользователей технологии 5G к концу 2023 г. достигло уже 32,8 млн человек. Трафик данных по технологии 5G за период 2019–2022 гг. вырос в стране в 16,8 раза [25]. Тем не менее отрицательное влияние ИКТ на окружающую среду можно снизить за счет использования их преимуществ в других секторах экономики для контроля за потреблением ресурсов, а также за счет использования возобновляемых источников энергии в самих телекоммуникационных компаниях. Как показывает пример Японии, внедрение интеллектуальных датчиков и устройств интернета вещей может помочь отслеживать и контролировать использование оборудования, что приведет к более эффективному управлению энергопотреблением и минимизирует выбросы CO₂.

Литература

1. Galli A., Kitzes J., Wermer P., Wackernagel M., Niccolucci V. and Tiezzi E. An exploration of the mathematics behind the Ecological Footprint // International Journal of Ecodynamics. 2007. № 2(4). С. 250–257.
2. Ecological Footprint by Country 2024 [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/ecological-footprint-by-country>.
3. Global Footprint Network [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://data.footprintnetwork.org/?_ga=2.212873821.815859368.1715159626-183818638.1715159626#/countryTrends?type=BCpc,EFCpc&cn=237.
4. Galli A., Wiedmann T., Ercin E. Knoblauch D. Integrating ecological, carbon and water footprint into a «footprint family» of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet // Ecological Indicators 2012. № 16. С. 100–112.

5. Lin David, Hanscom Laurel, Murthy Adeline, Galli Alessandro, Evans Mikel, Neill Evan, Mancini Maria, Martindill Jon, Medouar Fatime-Zahra, Huang Shiyu. Wackernagel Mathis. Ecological Footprint Accounting for Countries: Updates and Results of the National Footprint Accounts, 2012–2018. Resources. 2018. № 7. С. 1–22.
6. Breakdown of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions by sector [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>.
7. Distribution of greenhouse gas emissions in the European Union (EU-27) in 2022, by sector [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/1325132/ghg-emissions-shares-sector-european-union-eu/>.
8. Lanouar Charfeddine, Mohamed Umlai. ICT sector, digitization and environmental sustainability: A systematic review of the literature from 2000 to 2022 // Renewable and Sustainable Energy

Reviews. 2023. T. 184. C. 113482. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113482.

9. The Ecological Footprint of Computer Technology: Taking Action for a Sustainable Future [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://time.news/the-ecological-footprint-of-computer-technology-taking-action-for-a-sustainable-future/>.

10. Carbon Footprint of Data Centers & Data Storage Per Country (Calculator) [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://8billiontrees.com/carbon-offsets-credits/carbon-ecological-footprint-calculators/carbon-footprint-of-data-centers/#ref-8>.

11. Khan Asif and wu, ximei, Digital Economy and Environmental Sustainability Do Information Communication and Technology (ICT) and Economic Complexity Matte (September 30, 2022) [Электрон. ресурс] // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. № 19. 12301. Режим доступа: <https://ssrn.com/abstract=4236395>.

12. Ehigiamusoe, Kizito & Lean, Hooi Hooi & Mustapha, Marina & Ramakrishnan, Suresh. Industrialization, globalization, ICT, and environmental degradation in Malaysia: A frequency domain analysis. Heliyon. 9. 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20699.

13. Frey Sibylle, Harrison David, Billett Eric. Ecological Footprint Analysis Applied to Mobile Phones // Journal of Industrial Ecology. 2006. № 10. C. 199–216. DOI: 10.1162/108819806775545330.

14. Sulisnaningrum E., Mutmainah S., Bawono S., Drean, B. Investigating the Impact of ICT Developments on the Environment in the Digital Economy and Green Economy in Southeast Asia // Intern. Journal of Profess. Bus. Review. Miami. 2023. T. 8. № 5. C. 01–12.

15. The World Bank and ITU. 2024. Measuring the Emissions & Energy Footprint of the ICT Sector [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099121223165540890/pdf/P17859712a9880541a4b71d57876048abb.pdf>.

16. Tahsin Saadi Sedik. Asia's Digital Revolution [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2018/09/asia-digital-revolution-sedik#:~:text=In%20most%20of%20Asia%2C%20the,7.7%2C%209.7%20and%203.5%20percent>.

17. The World Bank Data [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://data.worldbank.org/indicator>.

18. Korea Ecological Footprint Report 2016. Measuring Korea's impact on nature [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://www.footprintnetwork.org/content/documents/2016_Korea_EF_Report_English_lo.pdf.

19. International Energy Agency [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.iea.org/>

20. Kim Y. The Impact of Digital Transformation to Climate Change: Analyzing the Digital Transformation Panel Data in the Asia-Pacific [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.adb.org/sites/default/files/event/902746/files/d3-s3a-p1-1presenter-yuna-kim-rev.pdf>.

21. ITU. Digital development dashboard [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Dashboards/Pages/Digital-Development.aspx>.

22. KDDI Integrated Sustainability and Financial Report 2023 [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.kddi.com/english/corporate/ir/library/sustainability-integrated-report/>.

23. SoftBank. Environment [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://group.softbank/en/sustainability/esg_data.

24. Китай за прошлый год развернул почти 3,5 млн базовых станций 5G [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.content-review.com/articles/63325/>.

25. ITSTAT [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://www.itstat.go.kr/itstat/kor/tblInfo/TblInfoList.html?vw_cd=MT_ATITLE.

References

1. Galli A., Kitze J., Wermer P., Wackernagel M., Niccolucci V. and Tiezzi E. An exploration of the mathematics behind the Ecological Footprint. International Journal of Ecodynamics. 2007; 2(4): 250–257.

2. Ecological Footprint by Country 2024 [Internet]. Available from: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/ecological-footprint-by-country>.

3. Global Footprint Network [Internet]. Available from: https://data.footprintnetwork.org/?_ga=2.212873821.815859368.1715159626-183818638.1715159626#/countryTrends?type=B-Cpc,EFCpc&cn=237.

4. Galli A., Wiedmann T., Ercin E. Knoblauch D. Integrating ecological, carbon and water footprint into a “footprint family” of indicators:

Definition and role in tracking human pressure on the planet. Ecological Indicators 2012; 16: 100–112.

5. Lin David, Hanscom Laurel, Murthy Adeline, Galli Alessandro, Evans Mikel, Neill Evan, Mancini Maria, Martindill Jon, Medouar Fatime-Zahra, Huang Shiyu. Wackernagel Mathis. Ecological Footprint Accounting for Countries: Updates and Results of the National Footprint Accounts, 2012–2018. Resources. 2018; 7: 1–22.

6. Breakdown of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions by sector [Internet]. Available from: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>.

7. Distribution of greenhouse gas emissions in the European Union (EU-27) in 2022, by sector [Internet]. Available from: <https://www.statista.com/statistics/1325132/ghg-emissions-shares-sector-european-union-eu/>.

8. Lanouar Charfeddine, Mohamed Umlai. ICT sector, digitization and environmental sustainability: A systematic review of the literature from 2000 to 2022. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023; 184: 113482. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113482.
9. The Ecological Footprint of Computer Technology: Taking Action for a Sustainable Future [Internet]. Available from: <https://time.news/the-ecological-footprint-of-computer-technology-taking-action-for-a-sustainable-future/>.
10. Carbon Footprint of Data Centers & Data Storage Per Country (Calculator) [Internet]. Available from: <https://8billiontrees.com/carbon-offsets-credits/carbon-ecological-footprint-calculators/carbon-footprint-of-data-centers/#ref-8>.
11. Khan Asif and wu, ximei, Digital Economy and Environmental Sustainability Do Information Communication and Technology (ICT) and Economic Complexity Matte (September 30, 2022) [Internet]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022; 19: 12301. Available from: <https://ssrn.com/abstract=4236395>.
12. Ehigiamusoe, Kizito & Lean, Hooi Hooi & Mustapha, Marina & Ramakrishnan, Suresh. Industrialization, globalization, ICT, and environmental degradation in Malaysia: A frequency domain analysis. *Heliyon*. 9. 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20699.
13. Frey Sibylle, Harrison David, Billett Eric. Ecological Footprint Analysis Applied to Mobile Phones. *Journal of Industrial Ecology*. 2006; 10: 199-216. DOI: 10.1162/108819806775545330.
14. Sulisnaningrum E., Mutmainah S., Bawono S., Drean, B. Investigating the Impact of ICT Developments on the Environment in the Digital Economy and Green Economy in Southeast Asia. *Intern. Journal of Profess. Bus. Review*. Miami. 2023; 8; 5: 01-12.
15. The World Bank and ITU. 2024. Measuring the Emissions & Energy Footprint of the ICT Sector [Internet]. Available from: [worldbank.org/curated/en/099121223165540890/pdf/P17859712a98880541a4b71d57876048abb.pdf](https://documents1.worldbank.org/curated/en/099121223165540890/pdf/P17859712a98880541a4b71d57876048abb.pdf)
16. Tahsin Saadi Sedik. Asia's Digital Revolution [Internet]. Available from: <https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2018/09/asia-digital-revolution-sedik#:~:text=In%20most%20of%20Asia%2C%20the,7.7%2C%209.7%20and%203.5%20percent.>
17. The World Bank Data [Internet]. Available from: <https://data.worldbank.org/indicator>.
18. Korea Ecological Footprint Report 2016. Measuring Korea's impact on nature [Internet]. Available from: https://www.footprintnetwork.org/content/documents/2016_Korea_EF_Report_English_lo.pdf.
19. International Energy Agency [Internet]. Available from: <https://www.iea.org/>
20. Kim Y. The Impact of Digital Transformation to Climate Change: Analyzing the Digital Transformation Panel Data in the Asia-Pacific [Internet]. Available from: <https://www.adb.org/sites/default/files/event/902746/files/d3-s3a-p1-1pre-senter-yuna-kim-rev.pdf>.
21. ITU. Digital development dashboard [Internet]. Available from: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Dashboards/Pages/Digital-Development.aspx>.
22. KDDI Integrated Sustainability and Financial Report 2023 [Internet]. Available from: <https://www.kddi.com/english/corporate/ir/ir-library/sustainability-integrated-report/>.
23. SoftBank. Environment [Internet]. Available from: https://group.softbank/en/sustainability/esg_data.
24. China deployed almost 3.5 million 5G base stations last year = China deployed almost 3.5 million 5G base stations last year [Internet]. Available from: <https://www.content-review.com/articles/63325/>.
25. ITSTAT [Internet]. Available from: https://www.itstat.go.kr/itstat/kor/tblInfo/TblInfoList.html?vw_cd=MT_ATITLE.

Сведения об авторе

Марина Геннадьевна Дубинина

Центральный экономико-математический институт (ЦЭМИ) РАН,
Москва, Россия

Эл. почта: mgdub@yandex.ru

Information about the author

Marina G. Dubinina

Central Economic and Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

E-mail: mgdub@yandex.ru