

Сценарии системных переходов для энергетики и экономики

Гилберт Ахамер

Старший научный сотрудник ^a, эксперт ^b, gilbert.ahamer@uni-graz.at

^a Институт истории экономики Университета Граца (Institute for Economic History at the Graz University), Brandhofgasse 5, 8010 Graz, Austria

^b Австрийское агентство по охране окружающей среды (Environment Agency Austria), Spittelauer Lände 5, 1090 Vienna, Austria

Аннотация

Распространенные подходы к прогнозированию «многослойных» социально-экономических систем линейными подходами мало применимы в условиях нарастающей сложности. Возникает необходимость учитывать экспоненциальные, скачкообразные изменения контекста. В статье представлен новый метод количественного прогнозирования на основе Базы данных о глобальных изменениях (Global Change Data Base, GCDB). Этот

многофункциональный инструментарий дает возможность анализировать тренды в глобальной экономической системе, позволяя глубже понять ее динамику и создает информационную основу для разработки сценариев развития энергетики, экономики и землепользования на общемировом и национальном уровнях. Представлен ландшафт переходов для стран с разным уровнем развития и секторов экономики в нелинейной динамике.

Ключевые слова: энергетический Форсайт; глобальное моделирование; База данных глобальных изменений; сценарии; топливный баланс; экстраполяция трендов; сценарий «обычная динамика»; изменение землепользования; насыщение; самоорганизующиеся системы

Цитирование: Ahamer G. (2022) Scenarios of Systemic Transitions in Energy and Economy. *Foresight and STI Governance*, 16(3), 17–34. DOI: 10.17323/2500-2597.2022.3.17.34

Scenarios of Systemic Transitions in Energy and Economy

Gilbert Ahamer

Senior Researcher ^a, Expert ^b, gilbert.ahamer@uni-graz.at

^a Institute for Economic History at the Graz University, Brandhofgasse 5, 8010 Graz, Austria

^b Environment Agency Austria, Spittelauer Lände 5, 1090 Vienna, Austria

Abstract

For the energy economics sector, earlier forecasting approaches (e.g., a Kaya identity or a double-logarithmic function) proved too simplistic. It is becoming necessary to systemically include the emergence of new discrete evolutionary changes. This paper provides a novel quantitative forecasting method which relies on the Global Change Data Base (GCDB). It allows for the generation and testing of hypotheses on future scenarios for energy, economy, and land use on a global and country level.

The GCDB method envisages systemic variables, especially quotients (such as energy intensity), shares (such as GDP shares, energy mix), and growth rates including their change rates. Thus, the non-linear features of evolutionary developments become quantitatively visible and can be corroborated by plots of large bundles of time-series data. For the energy industry, the forecasting of sectoral GDP, fuel shares, energy intensities, and their respective dynamic development can be undertaken using the GCDB method.

Keywords: energy foresight; global modelling; Global Change Data Base; scenarios; heuristic modelling; fuel mix; trends extrapolation; dynamics-as-usual scenario; land use change; saturation; autopoietic systems

Citation: Ahamer G. (2022) Scenarios of Systemic Transitions in Energy and Economy. *Foresight and STI Governance*, 16(3), 17–34. DOI: 10.17323/2500-2597.2022. 3.17.34

Введение

Применение экспертных систем для сбора и анализа количественных данных на основе методов Форсайта повышает качество стратегий во всех секторах экономики (Lu et al., 2009; MacHaris et al., 2012; Mattiussi et al., 2014; Seuring, 2013). В нашей предыдущей работе (Ахамер, 2018) представлен метод картирования тенденций с использованием Базы данных глобальных изменений (Global Change Data Base, GCDB), позволяющий выявить динамику социально-экономических систем, связанных с энергетикой. Он предполагает построение и визуальный анализ графиков на основе статистики временных рядов по странам. Доступные глобальные данные служат для перерасчетов и по-разному комбинируются. Таким образом выявляются временные производные и динамические связи между экономическими показателями (ВВП на душу населения) и другими структурными переменными, формируя системное представление о глобальных трендах (Castells, 1996; Christian, 2005). В свою очередь оно становится отправной точкой для разработки сценариев и оценки исходя из этого возможности маневра той или иной страны в различных контекстах.

В нашей статье анализируются «системные переходы» (*systemic transitions*) в энергетике и экономике с применением метода GCDB. Цель исследования заключается в создании информационной базы для разработки сценариев в рассматриваемых областях. Комплексное видение указанных процессов позволит гибко реструктуризировать и адаптировать национальные институты к динамике развития глобальных энергетических и экономических систем.

При помощи GCDB формируются детализированные временные ряды по странам с учетом многообразия секторов и видов топлива, открывая более широкие, в сравнении с другими базами данных, возможности для составления сценариев¹.

Методология

По сравнению с числовым представлением графический формат более наглядно демонстрирует корреляцию по странам на основе временных рядов, существенно расширяет возможности для интерпретации информации. В наших предыдущих работах (Ахамер, 2014, 2021; Ахамер, 2018) обоснованы ключевые характеристики GCDB и преимущества комбинирования наборов данных, которые редко используются совместно (например, о землепользовании², энергетике³ и экономике⁴).

Комбинирование стало возможным благодаря решению сложных задач совместимости сведений из разных баз данных о секторах экономики и типах топлива. Пользователь GCDB может выбирать из массивы данных, подлежащие сравнению, и отобразить их в логарифмическом либо в линейном виде по двум осям системы координат.

Вероятность обнаружить «эволюционные тенденции» повышается при работе с наборами очищенных (усредненных) данных по сравнению с теми, где корреляция практически отсутствует. Для формирования теорий выбираются наиболее тесно взаимосвязанные графики, примеры которых приведены ниже. Визуальные экстраполяции тенденций открывают различные опции для политических инициатив, особенно в ситуациях расхождения с глобальными трендами либо неполного использования имеющегося структурного потенциала. Например, показатель энергоёмкости в авторитарных государствах был в 5–10 раз ниже, чем в свободных рыночных экономиках. Повышение его среднего значения в мировом масштабе коррелирует с постепенным распространением демократических систем.

Факторная формула на основе последовательности коэффициентов

GCDB повышает точность выявления долгосрочных тенденций развития глобальной энергетической системы на основе детального статистического анализа. Структура параметров, применимая в ходе такого исследования, предложена на рис. 1. Эта факторная декомпозиция образует «тождество Кайи» (Kaya, Keiichi, 1997; Peters et al., 2017; Feron, 2016). Она охватывает такие важные параметры, как численность населения, состояние экономики (ВВП), спрос на конечную (E_{final}) и первичную (сырую) энергию (E_{prim}), которые анализируются в динамике на страновом уровне.

Представление недавних трендов и обозримых перспектив в виде формулы позволяет целостно охватить все этапы логической цепочки:

- энергетические технологии и виды топлива, характеризующиеся фактором выбросов (CO_2/E_p);
- эффективность преобразования первичной энергии в конечную (E_p/E_f);
- эффективность экономики с позиций «энергоёмкости» (E_f/GDP);
- уровень экономического развития страны, измеряемый величиной ВВП на душу населения ($GDP/capita$);
- численность населения.

¹ Среди них, прежде всего, следует выделить базу данных Международного института прикладного системного анализа (International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA). <https://previous.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/Databases.en.html>, дата обращения 18.11.2021.

² Крупнейшим ресурсом в этом отношении считается база данных Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (Food and Agriculture Organization, FAO). <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/ru/>, дата обращения 18.11.2021.

³ Широкое применение, в частности, получила база данных Международного энергетического агентства (International Energy Agency, IEA). <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser>, дата обращения 18.11.2021.

⁴ Например, базы данных Статистического отдела Секретариата Организации Объединенных Наций (United Nations Statistics Division, UNSTAT). <https://unctadstat.unctad.org/EN/>, дата обращения 18.11.2021.

Рис. 1. Основные переменные статистического анализа

Pop	GDP	E final	E prim
	GDP / cap	E _f / cap	E _p / cap
		E _f / GDP	E _p / GDP
			E _p / E _f

Примечание: используются несколько наборов коэффициентов по ключевым параметрам, таким как численность населения, спрос на энергию (конечную и первичную) и уровень экономического развития (ВВП).

Источник: составлено автором.

В общем виде факторная формула имеет вид:

$$CO_2 = (CO_2 / E_p) \times (E_p / E_f) \times (E_f / GDP) \times (GDP / \text{capita}) \times \text{population}$$

где: CO₂ — уровень выбросов CO₂; E_p и E_f — спрос на первичную и конечную энергию соответственно (для конкретного энергоносителя); GDP — валовая добавленная стоимость (в определенном секторе экономики); P — численность населения.

С учетом многообразия секторов и видов топлив получаем детализированный вид формулы:

$$CO_2(c, y) = \sum CO_2(c, y, f, s) = [CO_2(c, y, f, s) / E_p(c, y, f, s)] \times [E_p(c, y, f, s) / E_f(c, y, f, s)] \times [E_f(c, y, f, s) / GDP(c, y, s)] \times [GDP(c, y, s) / P(c, y)] \times P(c, y)$$

где: c — страна, y — год, f — топливо, s — сектор экономики.

В отличие от простых корреляций, анализ глобальной эволюции требует осторожного обращения с ситуациями неопределенности и отклонениями от общих трендов. Поэтому в нашей статье для оценки наиболее значимых показателей использованы графические средства. В сравнении с обычными числовыми коэффициентами корреляции они более наглядно отражают уровни, темпы роста, тенденции и статистические «выбросы» на фоне прогнозируемых траекторий.

Использованные данные и экстраполяция

Данные, положенные в основу статьи, носят ретроспективный характер. При наличии очевидного коэффициента корреляции можно самостоятельно экстраполировать их в будущее в соответствии со своими интересами и представлениями о том, как будет развиваться глобальный контекст (Christian, 2018).

Очевидно, экстраполировать на несколько лет вперед безопаснее, чем на несколько десятилетий. На представленных ниже графиках такая экстраполяция (в виде отдельных кривых) в большинстве случаев отсутствует, поскольку это могло бы создать ложное впечатление о наличии надежных допущений относительно будущих тенденций. Поэтому автор воздерживается от прямого «расчета будущего» по регрессионной формуле.

Реальность гораздо сложнее и не поддается описанию с помощью лишь нескольких статистических параметров. Она включает инновации, стадии насыщения, политические конфликты и отклонения от представляющихся стабильными тенденций вследствие культурной специфики (Ahamer, Kumpfmüller, 2013). Например, недавно принятые решительные меры по борьбе с изменением климата уже привели к заметному сокращению выбросов CO₂ в ряде стран. Таким образом, экстраполяция тенденций во многих случаях является не более чем гипотезой о возможных структурных переменах, вероятность которых необходимо оценивать.

Прошлые системные переходы

Притом что историческое развитие в целом имеет преимущественно эволюционный характер, в функциональном структурном взаимодействии технико-социально-экономических параметров антропосферы можно выделить определенные этапы или скачки, обуславливающие ступенчатую, усложняющуюся самоорганизацию ноосферы (Jäger, Springler, 2012; Kondratieff, 1984; Christian, 2018; Raskin, 2016).

В мировой эволюции имеют место ряд фундаментальных трендов, продолжающихся столетиями, такие как, скажем, распространение демократических систем.

Однако на их фоне вероятными альтернативами остаются радикальные (как разрушительные, так и прогрессивные) варианты глобальной трансформации. В тот или иной момент времени разные процессы подталкивают к определенным сценариям. Такие базовые цивилизационные аспекты, как производство и потребление энергии, демография и ВВП, в разные времена переживали и динамичный рост, и стагнацию.

К переходным этапам, характеризующимся стремительными и масштабными трансформациями, относятся (Christian, 2005):

- демографические сдвиги;
- изменения схем землепользования, связанные с масштабной вырубкой лесов под сельхозугодия;
- переходы в массовом использовании от одного источника энергии к другому, с сопутствующими главными загрязнителями.

Ввиду ступенчатого характера «эволюции через переходы» простая экстраполяция тенденций становится невозможной ни как научный метод, ни как практический инструмент Форсайта. Необходимо творческое выявление критических точек, определяющих общую динамику развития цивилизации, включая стадии насыщения, поворотные моменты и появление новых, неожиданных на первый взгляд феноменов. Метод GCDB учитывает эту сложную динамику путем анализа первой и второй производных временных рядов данных (Ахамер, 2018).

Демографический переход

В качестве первого примера для демонстрации возможностей GCDB в выявлении глобальных тенденций выбран демографический (популяционный) переход, признанный одной из наиболее масштабных структурных трансформаций в антропосфере (Galor, 2012; Akaev

et al., 2012). Он подробно раскрывается в работах (Chen, 2014; Fischer, 2008; Zhang, 2002; Du, Yang, 2014; Toft, 2007; Shen, Spence, 1996; Ssewamala, 2015; Jeníček, 2010; Nielsen, Fang, 2007). Повышение уровня образования привело к сокращению рождаемости во многих странах (Krvadal, Rindfuss, 2008; Mills et al., 2011; Raymo et al., 2015; Upadhyay et al., 2014). Впрочем, этот тренд имеет разную специфику в зависимости от местных структурных условий. Одновременно вследствие повышения качества медицинской помощи снизился уровень смертности.

Под влиянием упомянутых факторов общие темпы прироста населения ($d \text{ pop}/dt$) замедлились. На рис. 2 этот процесс отражен в виде функции среднедушевого ВВП (красные линии иллюстрируют средние для стран показатели в период 1960–1991 гг.). Иными словами, изменился характер глобального вызова — на смену демографическому взрыву пришло снижение численности населения, особенно в странах «Глобального Севера».

Вырубка лесов для увеличения пахотных земель

Другой трансформационный процесс, часто описываемый в литературе, — «переход в области землепользования» (*land use transition*) (Macedo et al., 2012; Baumann et al., 2011; Grau, Aide, 2008; Rounsevell et al., 2012; Munteanu et al., 2014; Long, Qu, 2018; Meyfroidt et al., 2018; Nuissl et al., 2009)⁵. Для его оценки в GCDB представлена долгосрочная динамика усредненных значений по странам.

Повсеместная в прошлом масштабная вырубка лесов, обусловленная острой потребностью в «новых сельскохозяйственных землях», сократилась благодаря развитию высокопроизводительных угодий. Подобная тенденция, отраженная на рис. 3 в виде функции среднедушевого ВВП, особенно очевидна для стран Европы и других государств с высоким значением упомянутого показателя.

Представленный график показывает: чем выше уровень экономического развития, тем меньшие масштабы вырубки лесов требуются для функционирования экономики, а в отдельных случаях даже осуществляется лесоразведение. Вместе с тем продемонстрирована когнитивная ограниченность представлений о будущем экономики как простом продолжении прошлого и подчеркнута принципиальная необходимость мультипарадигменной Форсайт-методологии (Vester, von Hesler, 1980; Ahamer, Jekel, 2010).

Системные изменения в динамике загрязнения атмосферы и топливно-энергетическом балансе

История охраны окружающей среды показывает, как менялись представления о наиболее опасных загрязнителях воздуха. Выявлена их связь с источниками энергии, получившими распространение в разные периоды. На начальном этапе экологи фокусировались на «классических загрязнителях» — пыль, оксиды углерода и серы (CO и SO₂). На смену им пришли оксиды азота (NO_x) и углеводороды (чаще всего выделяются

Рис. 2. Темпы роста численности населения в мире в последние десятилетия



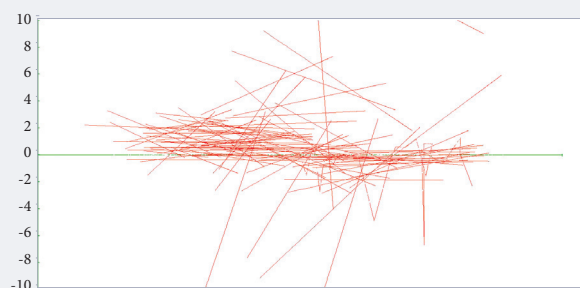
Примечание: возможная траектория развития промышленно развитых стран, таких как Россия или Австрия, показана серым цветом.

Источник: составлено автором.

транспортными средствами), признанные виновниками разрушения озона и роста респираторных заболеваний. Затем на первый план выходят диоксид углерода (CO₂) и другие парниковые газы как системные факторы жизнедеятельности любого общества, основанной на использовании ископаемого топлива (Meadows et al., 1972; Lovelock, 1988).

В каждом периоде прослеживается собственный главный загрязнитель окружающей среды, начиная от мелкой угольной пыли и CO и кончая глобальным загрязнением парниковыми газами и CO₂. Роли «виновников» меняются по мере эволюции в понимании механизмов окружающей среды. Упомянутые экологические проблемы решались (по крайней мере частично) в следующей последовательности. В 1960–1990-е гг. было существенно снижено содержание в воздухе пыли, CO и SO₂, прежде всего с помощью технологий фильтрации («на выходе»). На протяжении 1990–2010-х гг. постепенно сокращалось использование агентов, вредящих содержанию озона. В настоящее время в центре внимания природоохранной дея-

Рис. 3. Вырубка лесов (доля площади пахотных земель) как функция ВВП на душу населения

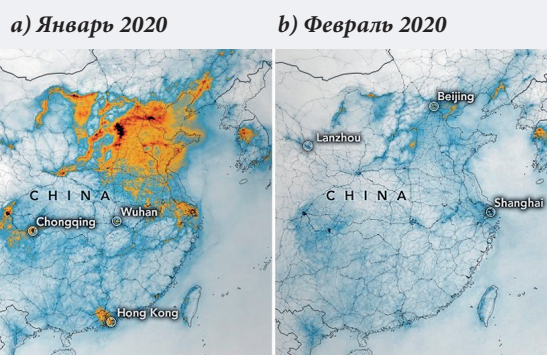


Примечание: слева направо, по мере эволюции постоянная вырубка лесов в развитых странах сменяется лесоразведением.

Источник: составлено автором по данным FAO, Всемирного банка, GCDB.

⁵ В исследовании (Fagua et al., 2019) используется термин «трансформация, связанная с вырубкой лесов» (deforestation transition).

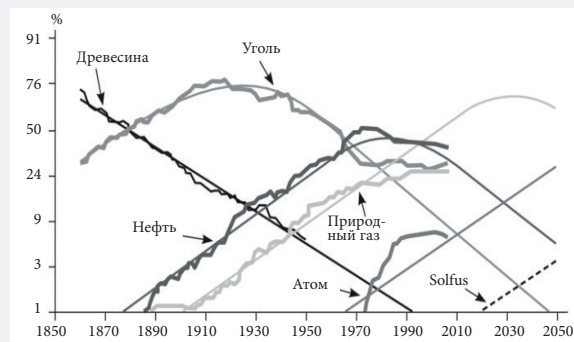
Рис. 4. Изменение концентрации оксида азота в атмосфере над Китаем



Примечание: В правой части рисунка по сравнению с левой наблюдается сильное снижение концентрации оксида азота в результате пандемии коронавируса и связанных с ней ограничений экономической деятельности..

Источник: <https://www.zeit.de/2020/14/emissionen-corona-krise-klimaschutz-treibhausgase-co2>, дата обращения 19.01.2022.

Рис. 5. «Кривая Марчетти»



Примечание: «Кривая Марчетти» объясняет прошлую и прогнозирует будущую структуру (процентное соотношение долей) энергоносителей на основе модели логистического замещения. Как можно видеть, более ранние прогнозы роста доли атомной энергии не оправдались (Ahamer, 2012), а «solfus» (солнечная или термоядерная энергия, авторы в то время еще не определились) на практике оказалась возобновляемой энергией. Сейчас эта кривая воспринимается как исторический документ техно-оптимистической эпохи.

Источник: адаптировано на основе (Marchetti, Nakićenović, 1979).

тельности находятся парниковые газы. Одновременно наблюдается переход от локального к системному уровню в решении экологических проблем. Усилия по минимизации воздействий ограниченного масштаба (например, выбросов из конкретной фабричной трубы) сменяются работой с масштабными структурными процессами, вызванными функционированием многочисленных источников выбросов, в том числе домохозяйств и транспортных средств. Данной тенденции сопутствуют принципиальные поведенческие сдвиги. Коронавирусный кризис привел к неожиданному открытию: выбросы в атмосферу всего за месяц «экономического простоя» сократились настолько, что внесли существенный вклад в улучшение ситуации с климатом (рис. 4).

Другой пример — изменения рыночных долей источников энергии (f), что на первый взгляд следует определенной закономерности. В конце 1970-х гг. Чезаре Марчетти (Chesare Marchetti) и его коллеги предложили отражать динамику этого процесса в виде двойной логарифмической кривой (Marchetti, Nakićenović, 1979). «Кривая Марчетти» иллюстрирует последовательность эпох, исходя из преобладающих (по доле рынка f) источников энергии (рис. 5). На начальном этапе развития цивилизации в качестве энергоносителя доминировала биомасса, на смену которой последовательно пришли уголь, затем нефть и, в настоящее время, газ.

Затем, по мнению авторов, должен был наступить век атома, который в то время представлялся более привлекательным. Конкретных будущих форм энергетики Марчетти и соавторы не обозначили: каждый читатель волен интерпретировать расплывчатую аббревиатуру «solfus» в соответствии со своими предпочтениями (она может означать и «солнечную» (solar), и термоядерную (fusion) энергию). Как видим, в предшествующие десятилетия исследователи стре-

мились к полной беспристрастности в соответствии с парадигмой «чистой науки». «Кривая Марчетти» приобрела широкую известность, однако, учитывая, как события развивались в действительности («оглядываясь назад», в данном случае на 40 лет), оказалась не вполне точной. Приведенный пример свидетельствует — чрезмерная ставка на некую идеологическую парадигму ухудшает качество прогнозирования и искажает предлагаемые сценарии.

Вклад различных секторов в развитие экономики

Проанализируем эволюционные сдвиги в структуре отраслей в зависимости от уровня экономического развития и графики, иллюстрирующие эти процессы.

Графическое представление траекторий роста отраслевого ВВП по континентам

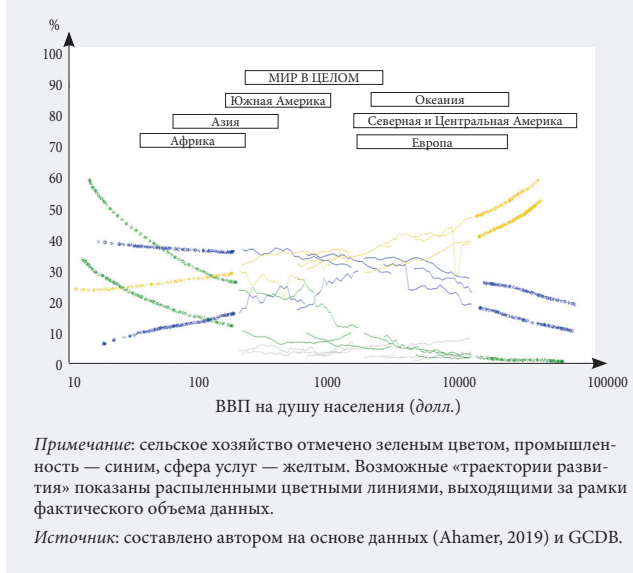
Ключевой фактор обоснованности любого прогноза — выявление структурных сдвигов в глобальных экономических системах (степени и последовательности их преобразований) (Sternan, 2000; Abler et al., 1971; Duraković et al., 2012). Возникают вопросы:

- Какие блага значимы для населения?
- В каких видах экономической деятельности их ценность находит отражение?
- Насколько стремление реализовать предпочтения трансформируется в соответствующие усилия?

Значимость того или иного сектора оценивается прежде всего его процентной долей, например, в затратах и в объеме производства услуг. Данные о ВВП позволяют корректно сравнивать эти аспекты для всех стран за прошлые десятилетия.

На рис. 6 представлены доли трех основных секторов ВВП по континентам в зависимости от уровня их экономического развития (GDP/cap). Распыленные

Рис. 6. Направления развития ключевых секторов в зависимости от подушевого ВВП (по континентам)



линии трех цветов показывают ширину окна для продолжения «траекторий развития» на планете, включая предполагаемые варианты, характеризующиеся менее значительными показателями ВВП на душу населения. Однако следует учитывать, что допущение о наличии «траекторий» само по себе означает согласие с одним из нескольких возможных мнений относительно парадигм развития. Речь идет о путях, идентичных для любой эволюции, — всем странам в той или иной степени предстоит следовать траектории «наиболее развитых» государств. Но наряду с этим оптимистичным представлением о развитии, описываемым теориями внутреннего роста, существуют и теории зависимости (Fischer et al., 2016; Ahamer, Kumpfmüller, 2013; Bader et al., 2013, 2014).

На рис. 7 для тех же континентов показаны процентные доли 10 сегментов ВВП как функция уровня экономического развития континента (GDP/cap). Он содержит более детальные сведения, но каждую конкретную траекторию развития отследить сложно. К тому же существенную роль играют потенциальные различия в охвате данных, создающие эффект ступенчатых функций.

На рис. 8 представлены подробные данные об отраслях промышленности с использованием линейной шкалы (в отличие от логарифмической шкалы на рис. 7). Динамика небольших (в несколько процентов) значений на вертикальной логарифмической шкале прослеживается более отчетливо, поскольку она лучше соответствует подразумеваемой парадигме «предположительно постоянного темпа относительных изменений в ходе развития» (Ester, 2002). Соответственно, в дальнейшем мы будем использовать именно эту шкалу.

Предполагаемые траектории развития можно нагляднее представить с помощью логарифмических (а не линейных) графиков, как видно из рис. 9 (рост доли сектора услуг на всех континентах). Метод GCDB предполагает поиск закономерностей на графиках — чем более характерными являются обнаруженные тенденции, тем убедительнее будет формула развития. Любая эволюция следует экспоненциальным, а не линейным законам.

Методологический смысл рис. 10 заключается в том, что графики отдельных стран без использования усредненных по времени данных, скорее всего, дадут менее четкую картину по сравнению с основанными на пространственных или временных агрегатах (как на других рисунках).

Вышеупомянутый экономический переход между секторами известен давно (Haggett, 2001). GCDB позволяет количественно оценить его относительную скорость и время начала для каждого отдельного сектора. Тем самым «экономический переход» становится общим для всех стран «естественным законом».

Рис. 7. Направления развития секторов в зависимости от подушевого ВВП (по континентам) — логарифмическая вертикальная шкала



Рис. 8. Направления развития промышленности в зависимости от подушевого ВВП (по континентам) — линейная вертикальная шкала

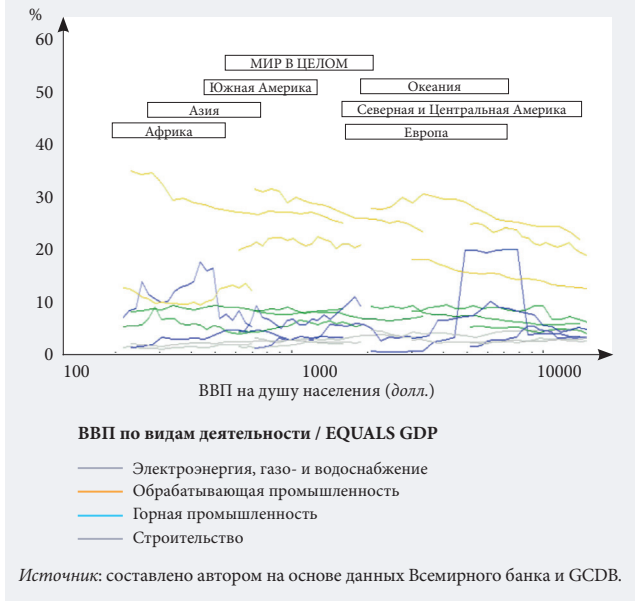


Рис. 9. Направления развития сервисных секторов промышленности в зависимости от подушевого ВВП (по континентам) — линейная вертикальная шкала

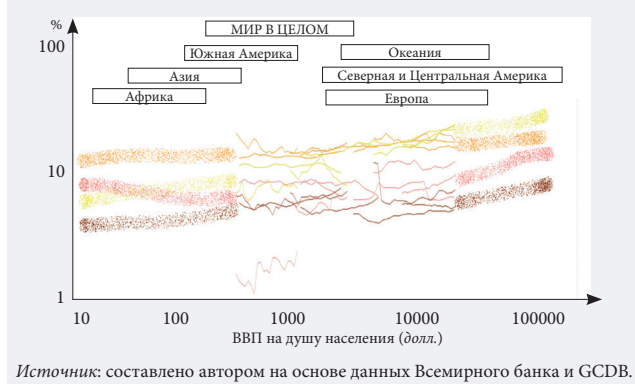
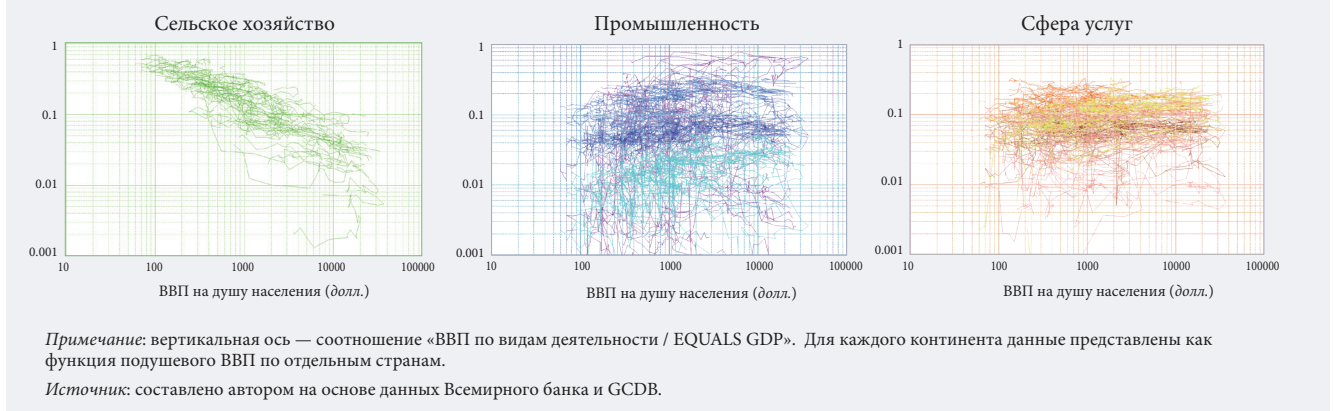


Рис. 10. Ключевые сегменты экономики как совокупности секторов



Визуализация траекторий отраслевого ВВП по странам

Рассмотрим, как возможности разных способов графического представления одних и тех же данных помогают учесть различные аспекты глобального экономического перехода.

На основе упомянутых графиков, иллюстрирующих внутриотраслевые сдвиги в ходе экономической эволюции (возможно, систематические — вопрос требует дальнейшего анализа), в настоящее время разрабатывается новый метод графической презентации.

Данные об эволюции предпочтительно отображать как функцию ВВП на душу населения, при этом необходимо четко показать процентную долю каждого сектора экономики. Кроме того, для большей наглядности траекторий следует использовать усредненные (в пространстве и по времени) показатели.

В качестве первого примера подобного графического представления, а также для иллюстрации различий между географическими регионами на рис. 11 приводится график динамики ВВП на душу населения как функция GDP/cap для подсектора энергетики «Электроэнергия, газ, пар»⁶. Одиннадцать учитываемых здесь регионов соответствуют моделям ИАША (IPCC, 2002; Ahamer, 2008, 2014, 2015).

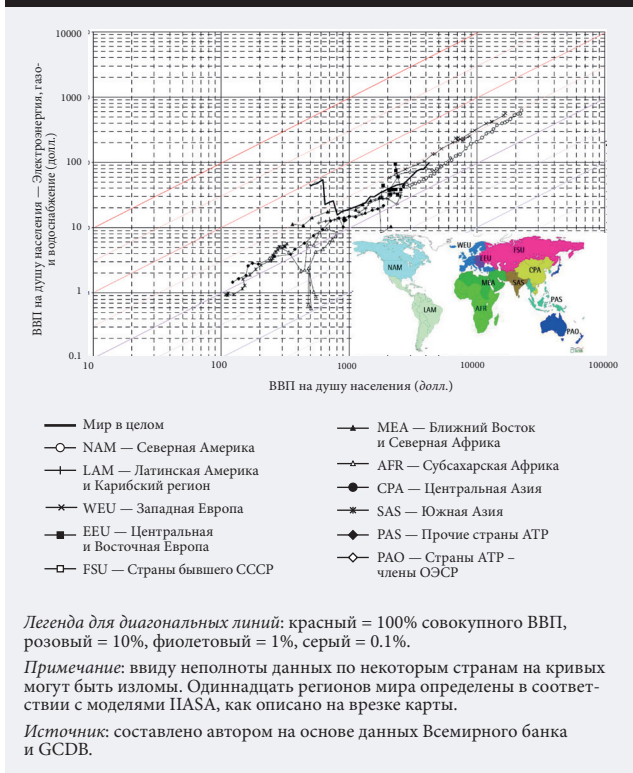
В процессе развития экономики растет и валовая добавленная стоимость рассматриваемой отрасли. Как следствие, кривые для всех континентов стремятся вправо и вверх. Процент совокупного ВВП можно определить путем соотношения с диагоналями (они соответствующим образом маркированы). Большой угол наклона вверх на рис. 11 означает положительный темп роста на рис. 13.

На рис. 12 та же информация, что на рис. 11, приведена по всем девяти секторам экономики. Кроме того, отражены совокупные статистически скорректированные показатели для промышленности и сферы услуг. Последовательность диагональных линий такая же, как на рис. 11, но линии обозначены синим цветом.

Можно видеть, что некоторые секторы не следуют «общей» траектории развития, а скорее «подчиняют»

⁶ В соответствии с классификацией видов экономической деятельности ООН. https://unstats.un.org/unsd/trade/classifications/SeriesM_53_Rev.5_17-01722-E-Classification-by-Broad-Economic-Categories_PRINT.pdf, дата обращения 14.01.2022.

Рис. 11. Динамика подушевого ВВП для сектора электроэнергетики как функция общего подушевого ВВП



ся» местным природным условиям. В первую очередь это горнодобывающая промышленность, что вполне понятно, поскольку ее географические и геологические критерии не зависят от экономического развития страны. Динамика других секторов явно соответствует «эволюционной траектории».

Далее представлены изменения темпов роста по девяти секторам. На рис. 13 стрелки показывают ди-

намику, примерно отвечающую усредненной для всех стран. На рис. 14 отражены средние темпы роста по отраслям, также в процентных пунктах.

Выводы в отношении динамики валовой добавленной стоимости

По результатам анализа приведенных выше цифр и выявления секторов с увеличивающимися темпами роста можно сделать следующие выводы в отношении того, в каких из них расширение деятельности в средне- и долгосрочной перспективе продолжится (положительная динамика в правой части рис. 14):

- технологическая инфраструктура (электричество, газ, вода) — в настоящее время уровень низкий, но темпы роста достаточно высокие;
- транспорт и связь;
- финансовые услуги и страхование;
- коммунальные и социальные услуги.

В данном случае в качестве переменных важно рассматривать темпы роста как таковые. Пересечение нулевой линии на рис. 14 (т. е. изменение математического знака) означает сдвиг, аналогичный известному демографическому переходу.

Общая картина представлена на рис. 15 в виде гипотетической траектории для сельского хозяйства, промышленности и сферы услуг. Она определяется уровнем экономического развития, который выражается в виде отраслевого ВВП на душу населения и интерпретируется как «воспринимаемая важность» соответствующего вида экономической деятельности.

Тенденции развития энергетики

Энергетический переход открывает серьезные возможности для разных стран, включая Россию (IRENA, 2017a, b; IRENA, 2022; Grechukhina, 2021). Традиционные прогнозы спроса на энергию обычно представляют собой линейную проекцию или пред-

Рис. 12. Динамика подушевого ВВП по секторам экономики как функция общего подушевого ВВП

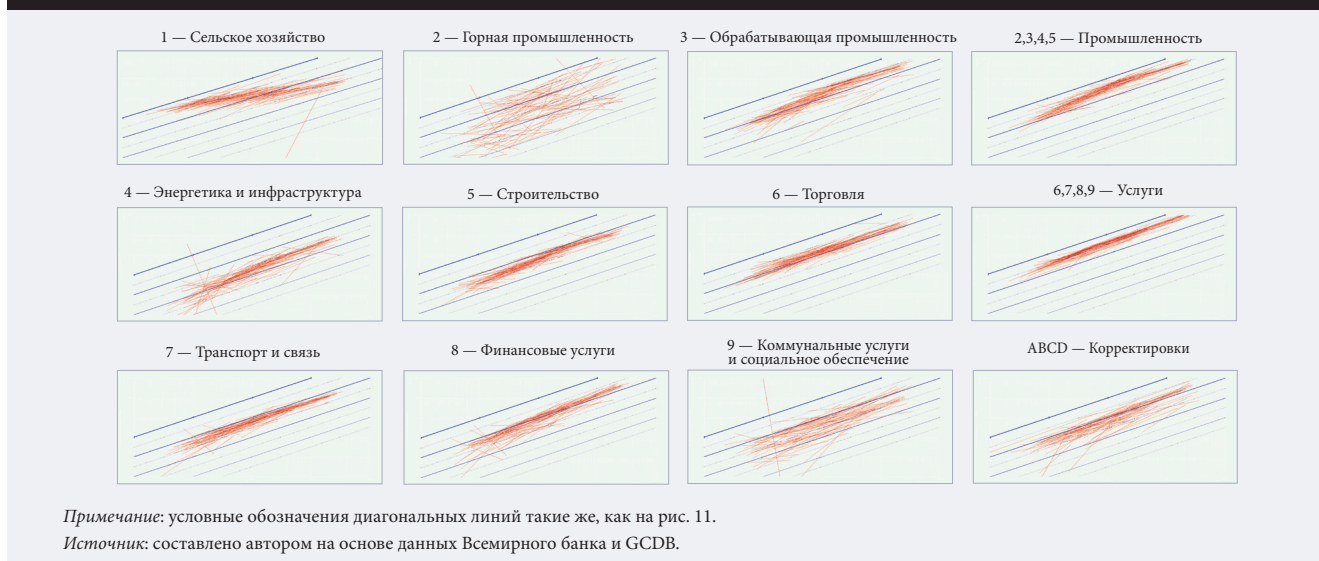
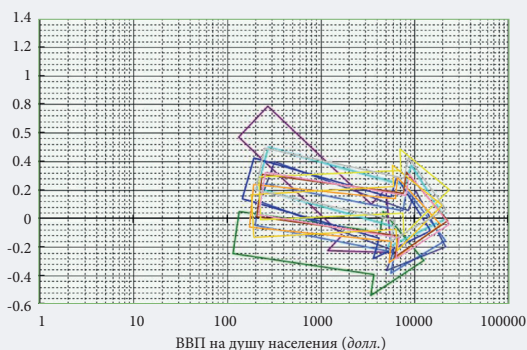
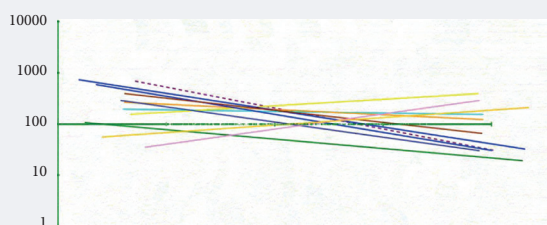


Рис. 13. Темпы роста секторов как функция общего поддушевого ВВП (абсолютные значения)



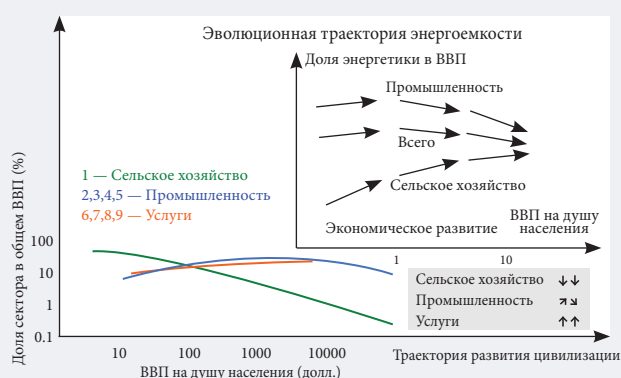
Примечание: цвета секторов такие же, как на рис. 12.
 Источник: составлено автором на основе данных Всемирного банка и GCDB.

Рис. 14. Темпы роста секторов как функция общего поддушевого ВВП (%)



Примечание: цвета секторов такие же, как на рис. 12.
 Источник: составлено автором на основе данных Всемирного банка и GCDB.

Рис. 15. Предполагаемая итоговая глобальная траектория развития ключевых секторов как функция общего поддушевого ВВП



Примечание: сельское хозяйство отмечено зеленым цветом, промышленность — синим, сфера услуг — желтым. Во врезке приведена дополнительная информация о динамике энергоёмкости в сельском хозяйстве и промышленности.

Источник: составлено автором на основе данных Всемирного банка и GCDB.

полагают незначительный экспоненциальный рост (IPCC, 2002; IIASA, 1998). Нередко они базируются на более ранних исследованиях IIASA, которые исходили из единой глобальной числовой константы — показателя снижения энергоёмкости (E/GDP), а именно -0.8% в год. Рассмотрим более совершенные способы отображения глобальной динамики.

Рост конечного энергопотребления

Динамика спроса на энергию в разных странах — ключевая характеристика глобального «энергетического перехода». На рис. 16 и последующих графиках отражен только усредненный показатель (красная линия), а не фактические значения, которые существенно варьируют. Примечательно, что в правой части графика темпы роста сходятся на отметке примерно 1% (развитые страны). К тому же наблюдаемая динамика имеет тенденцию к снижению и, по-видимому, в некоторых случаях уже стала отрицательной. Если экстраполировать тренд, сокращение спроса на энергию в перспективе связано со снижением ее потребления в развитых экономиках.

Энергетический переход означает самоорганизующуюся динамику, связанную с циклами отрицательной обратной связи в глобальной энергетической системе. В конечном итоге она может урегулировать основную массу «больших» энергетических проблем, в том числе связанных с парниковым эффектом.

Конечное потребление энергии на душу населения и темпы его роста

Одна из характерных и стабильных тенденций мирового «энергетического перехода» заключается в том, что вне зависимости от политической системы и уровня экономического развития рост потребления энергии на душу населения выравнивается. В некоторых странах поддушевые показатели конечного спроса на энергию изначально положительно коррелировали с ВВП (рис. 17). Это согласуется с известным фактом, что в развитых странах среднедушевое потребление выше и со временем растет. В совокупности факты указывают на неизбежное увеличение спроса на энергию.

Однако некоторые «учатся на прошлом опыте»: государства с ранее невысокими показателями ВВП на душу населения (например, Китай), возможно, уже идут по пути снижения среднедушевого энергопотребления (E/cap). На рис. 18 представлена динамика E/cap , которая подтверждает, что рост этого показателя фактически достиг стадии насыщения.

Энергоёмкость и темпы ее роста

Коэффициент энергоёмкости как ключевая характеристика экономики отражает соотношение объемов потребления конечной энергии и ВВП. В рамках фундаментальной стратегии борьбы с глобальным потеплением предстоит разорвать связь между энергопотреблением и экономическим ростом, однако решение задачи должно быть конкретным и рацио-

нальным. Данные, представленные на рис. 19, могут «убедить» в том, что энергоёмкость снижается естественным образом.

Более детальная картина динамики снижения E/GDP (возможно, закономерной) отражена на рис. 20. В странах со средним уровнем экономического развития (ВВП на душу населения порядка 1000–2000 долл.) энергоёмкость остается стабильной, однако по мере прогресса становится возможным ее существенное снижение (см. нижнюю часть рис. 20).

Анализ компонентов глобального «энергетического перехода» на основе количественных данных GCDB указывает на частичный вклад роста производства на единицу потребляемой энергии в этот процесс.

Изменение отраслевого спроса на энергию

Доли некоторых ключевых секторов в конечном энергопотреблении

Примерно по 30 секторам отраслевая классификация Международного энергетического агентства, на которой основан GCDB⁷, не совпадает с номенклатурой, используемой в экономической статистике ООН. По этой причине коэффициенты на рис. 1 невозможно рассчитать для всех отраслей (что, казалось бы, не должно вызывать трудностей), особенно когда необходимы одновременно данные по энергетике и ВВП.

Чтобы дать корректную и реалистичную иллюстрацию, на рис. 21 приводится ряд показательных примеров конечного энергопотребления (в процентах), в том числе в промышленности, сфере услуг и на транспорте.

Эволюционные процессы и динамика, описанные выше, предметно изучены и статистически подтверждены. В отличие от использованной в предыдущих разделах разбивки по ВВП, здесь представлена структура потребления энергии (доли совокупного спроса на нее) по отраслям (рис. 21). Например, на транспортный сектор приходится значительная доля потребления энергии. Помимо классического сектора услуг, «прочие» отрасли также включают домохозяйства, не связанные с созданием валовой добавленной стоимости в отраслях. Таким образом, рассчитать подробные коэффициенты E_i/GDP_i не всегда возможно.

Динамика отраслевой структуры энергопотребления

Данные об отраслевых темпах роста по странам (рис. 22) позволяют лучше понять эту динамику, особенно для развитых государств (в правой части графиков). Кривые визуализации тенденций и корреляций позволяют интерпретировать их следующим образом:

⁷ В частности, использована на рис. 17 в работе (Ахамер, 2018).

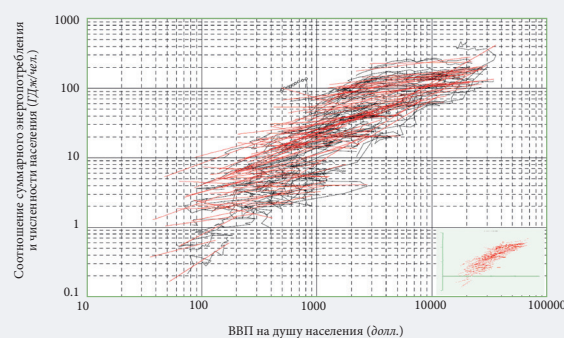
Рис. 16. Динамика конечного потребления энергии (E_{final}) (ПДж) как функция общего поддушевого ВВП



Примечание: по мере эволюции этот показатель очевидно снижается.

Источник: составлено автором на основе данных IEA и GCDB.

Рис. 17. Зависимость конечного потребления энергии на душу населения как функция поддушевого ВВП



Примечание: во врезке видны только красные линии, иллюстрирующие тенденцию. Эта переменная, судя по всему, приближается к состоянию насыщения.

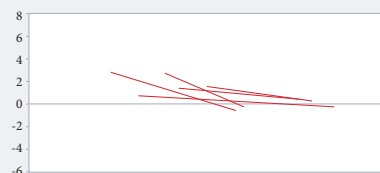
Источник: составлено автором на основе данных IEA и GCDB.

Рис. 18. Динамика конечного энергопотребления на душу населения как функция поддушевого ВВП

а) для отдельных стран



б) средние значения для континентов

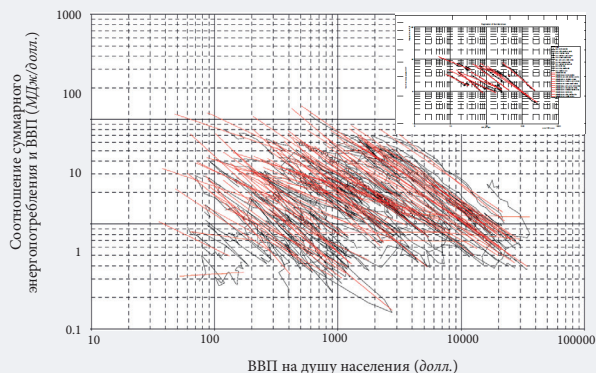


в) для 11 регионов



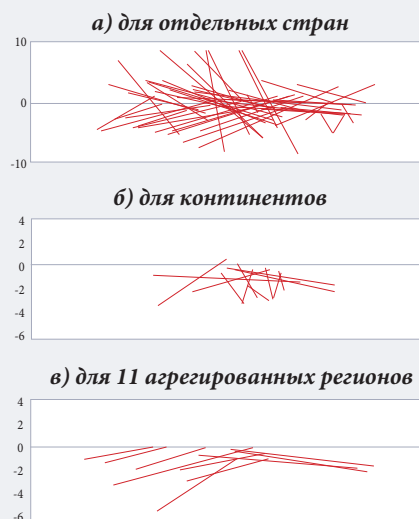
Источник: составлено автором на основе данных GCDB.

Рис. 19. Динамика конечного энергопотребления на душу населения как функция подушевого ВВП



Примечание: во врезке показаны только 11 регионов.
 Источник: составлено автором на основе данных IEA и GCDB.

Рис. 20. Динамика энергоёмкости как функция подушевого ВВП



Источник: составлено автором на основе GCDB.

- Доля спроса на энергию со стороны автомобильного транспорта постоянно растет; вероятно, тренд сохранится как в кратко-, так и в долгосрочной перспективе.
- Темпы увеличения доли энергопотребления авиационного транспорта были высокими и раньше, но в среднесрочной перспективе в экономически развитых странах могут значительно увеличиться, тогда как в государствах со средним уровнем развития должны замедлиться
- Относительное снижение доли энергопотребления железнодорожного транспорта пока сохраняется, но в развитых экономиках в среднесроч-

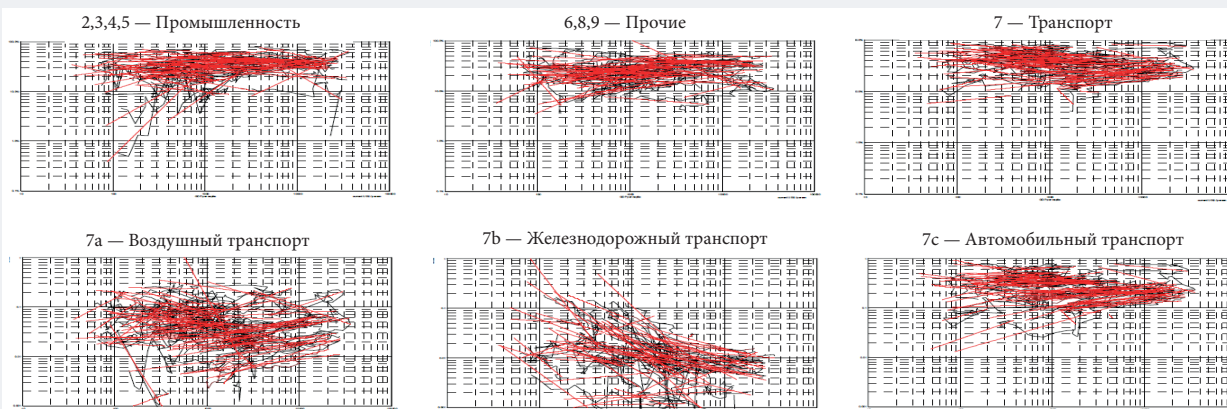
ной перспективе оно может смениться заметным ростом.
 Другие наблюдения обобщены в табл. 1.

Вклад источников энергии в конечное энергопотребление

Рассмотрим динамику долей потребления энергии, получаемой из более чем 20 источников. На рис. 23 отражены показатели удельного веса энергоносителей, детализированные по регионам, в средне- и долгосрочной перспективе.

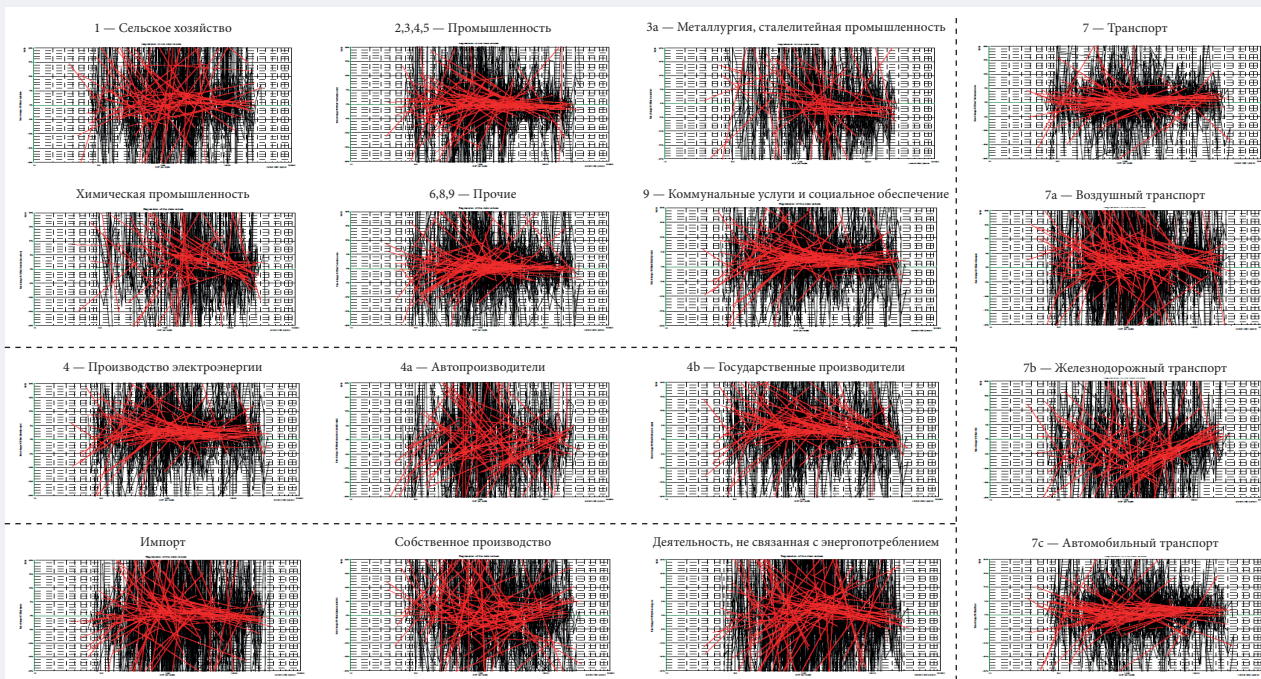
В среднесрочной перспективе снизится потребление угля и тяжелой нефти. После краткосрочного

Рис. 21. Доли энергопотребления в ключевых секторах



Примечание: примерно одинаковый уровень энергопотребления (выше) и разбивка для транспортного сектора (ниже); красными линиями отображены тенденции для всех стран.
 Источник: составлено автором на основе GCDB.

Рис. 22. Динамика долей энергопотребления отдельных отраслей



Примечание: включает подробную структуру энергопотребления в электроэнергетическом секторе (левый средний блок) и его поставщиками (левый нижний блок). В крайнем правом ряду представлена структура потребления в транспортном секторе. Тенденции для стран обозначены красными линиями; в центре графика располагается нулевая линия.

Источник: составлено автором на основе GCDB.

подъема последует долгосрочное сокращение спроса на все нефтепродукты, в частности дизельное топливо и бензин. На среднесрочном горизонте усилится востребованность природного газа и электроэнергии, в долгосрочном — биомассы, тепловой энергии и авиатоплива.

Динамика конечного потребления по источникам энергии

Расширенное представление о глобальной динамике раскрывают графики изменения спроса на различные энергоносители (рис. 24). По итогам анализа следу-

ет ряд выводов о возможных долгосрочных сдвигах в энергетическом балансе:

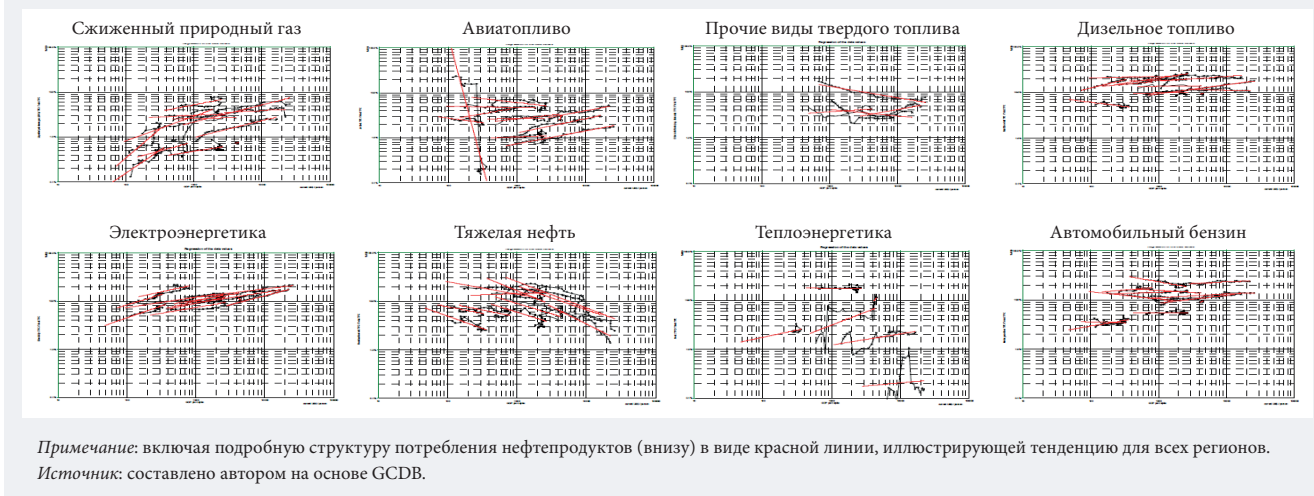
- потребление угля продолжает сокращаться, но более низкими темпами;
- падение спроса на нефтепродукты ускоряется;
- потребление газа стабилизировалось;
- востребованность электроэнергии устойчиво растет;
- потребление других видов твердого топлива (включая биомассу) увеличивается;
- экономия тепловой энергии стала существенно эффективнее;

Табл. 1. Интерпретация некоторых тенденций, выявленных на рис. 21

Перспектива	Тенденции
Краткосрочная (5–10 лет)	<ul style="list-style-type: none"> • Текущая низкая доля потребления энергии в сельском хозяйстве постепенно возрастает • Удельный вес энергопотребления в промышленности, находящийся на высоком уровне, со временем снижается, особенно в черной металлургии • Объем генерации электроэнергии как доля в общем энергопотреблении продолжает существенно расти, в основном для государственных производителей • Внутреннее производство источников энергии растет • Доля потребления энергии в сфере услуг медленно, но постоянно увеличивается
Средне- и долгосрочная (10–20 лет)	<ul style="list-style-type: none"> • В долгосрочной перспективе вклад компаний — потребителей в выработку электроэнергии («собственное производство») начнет расти • Текущая значительная доля неэнергетического использования в долгосрочной перспективе пойдет на спад • Динамика импорта постепенно замедляется • Темпы роста энергопотребления химической промышленности, прежде бывшие высокими, в долгосрочной перспективе начнут снижаться • Изначально существенный вклад транспортного сектора в энергопотребление продолжит расти

Источник: составлено автором.

Рис. 23. Структура отраслевого энергопотребления



- использование тяжелой нефти для производства нефтепродуктов нарастает ускоренными темпами;
- потребность в бензине умеренно растет, с небольшим отставанием следует дизельное топливо;
- развитые страны существенно сокращают потребление сжиженного природного газа;
- рост цен на авиатопливо замедляется в мировом масштабе.

Заключение

Фундаментальные изменения растянуты во времени и имеют сложную природу. Исходя из этого надежная квантификация долгосрочных глобальных системных тенденций приобретает особую ценность. Природу таких сдвигов целесообразно учитывать при разработке сценариев с помощью тех или иных методов, независимо от лежащих в их основе допущений, таких как:

- характер экономического роста — циклический или экспоненциальный;
- темпы исторического развития — равномерные либо скачкообразные (обусловленные переходами);
- рост либо снижение экономического неравенства населения;
- стиль выражения суждений об исторических процессах и будущем — повествовательный или формализованный.

Учитывая столь широкое разнообразие парадигм, метод GCDB, использующий количественную информацию о более чем 2500 массивах первичных данных по странам, позволяет анализировать множественные нелинейные непредсказуемые и неожиданные тенденции в экономике, энергетике и землепользовании.

В настоящей статье выявлены и графически представлены тенденции, касающиеся спроса и предложения энергии, эффективности и интенсивности ее использования, изменения топливного баланса, отраслевой структуры экономики, потребления и пред-

ложения энергии по секторам, а также динамики перемен.

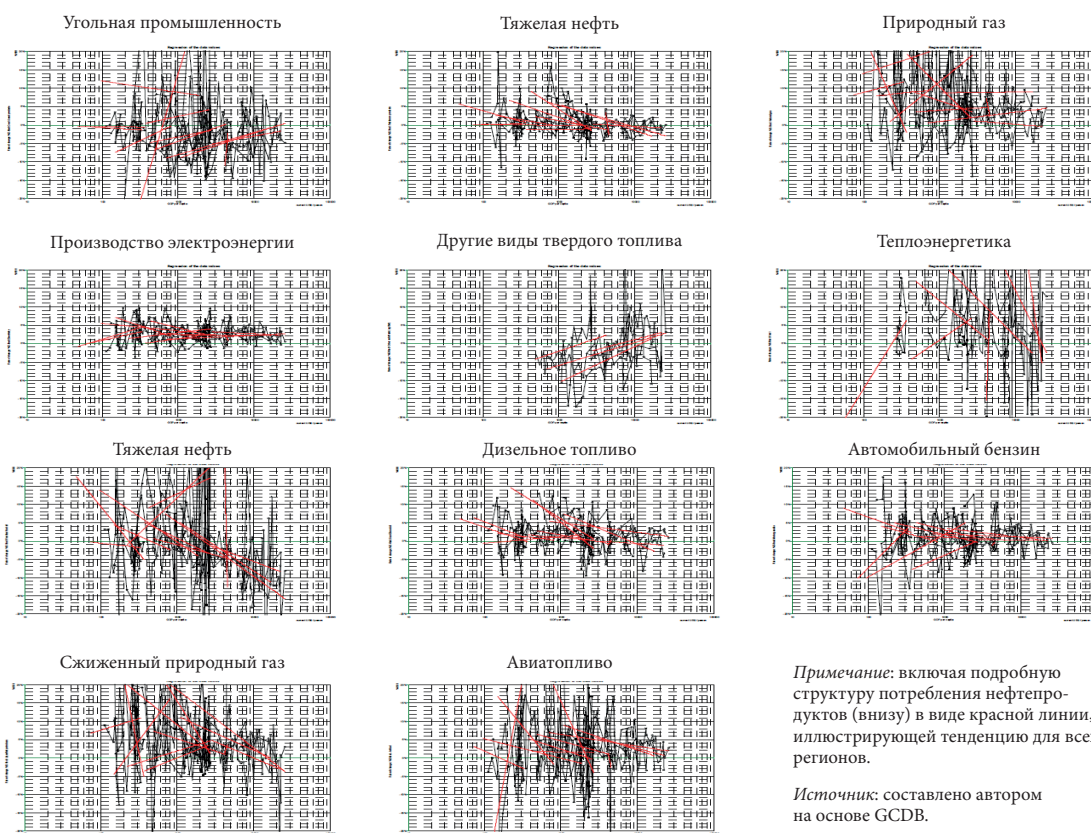
На первый взгляд представляется, что темпы роста мирового спроса на все виды энергии будут снижаться: пики потребления угля, нефти и газа скоро будут пройдены. Выявленные глобальные тенденции представляют угрозу для любой страны, экономика которой существенно зависит от нефти, газа и угля. Эффективная стратегия может включать активное развитие производства энергии из возобновляемых источников (биомасса, солнечная энергия, ветер) и ее интеграцию в национальные энергосети.

Однако более глубокий подход означает выход за рамки простого наблюдения «тенденций», основанного на допущении о линейном или экспоненциальном историческом развитии. Детальный анализ эволюционных парадигм (Ahmer, 2019) указывает на многочисленные комбинации циклов и тенденций. История не течет в направлении, которое можно было бы выразить строгими формулами или даже экспоненциальными либо синусоидальными кривыми. Сканирование при помощи метода GCDB показывает, что технико-социально-экономическая эволюция происходит в форме переходов. Напомним об известных примерах:

- демографический переход;
- переход к землепользованию с вырубкой лесов;
- сдвиг в массовом использовании от одного источника энергии к другому, каждому из которых сопутствуют собственные главные загрязняющие вещества;
- устойчивый исторический сдвиг в экономике — от сельского хозяйства к промышленности и далее к сектору услуг.

Среди наиболее выраженных тенденций энергетического перехода — стабильное замедление темпов конечного потребления энергии (E_{final}) на протяжении всей истории. Об этом свидетельствует приближение переменной «конечное потребление энергии

Рис. 24. Динамика энергопотребления по источникам энергии



на душу населения (E_{final}/cap)» к состоянию насыщения, проиллюстрированное темпами ее роста.

Наиболее неожиданный результат — резкое снижение значения и темпов роста переменной энергоемкости. Наблюдаемый энергетический переход (в смысле стратегического отказа от ископаемого топлива и переориентации на возобновляемые источники энергии) фактически лежит в основе всех современных стратегий по борьбе с изменением климата. Дополнительным стимулом стала недавно обострившаяся геополитическая обстановка, побудившая европейские страны ускорить движение к собственной энергетической независимости.

Что касается переходов внутри энергетического сектора в плане ставок на различные виды топлива, то в общей сложной картине выделяются несколько тенденций. Прежде всего отметим отказ от «грязных» (с обильными выбросами) первичных видов топлива (уголь и сырая нефть) в пользу ориентированных на потребителя и более чистых видов (электричество, тепло, СПГ и авиационное топливо). Одновременно уменьшается экономический вклад «тяжелых» отраслей (например, сталелитейной) промышленности и сельского хозяйства при увеличении доли услуг.

Переход наблюдается повсеместно, хотя время его начала по странам существенно варьирует (иногда

на несколько столетий). Чтобы «нормализовать» эти эффекты, в качестве замещающей переменной для измерения «периода эволюции» вместо хронологии часто применяют показатель экономического развития страны (ВВП на душу населения).

На более общем уровне выявлены существенные сдвиги по направлениям, в которых в определенные исторические периоды происходит бурный рост (при этом что и до, и после таких периодов их состояние остается относительно стабильным). Речь идет о таких аспектах, как демография (численность населения), ВВП, производство и потребление энергии. Эволюция здесь рассматривается как последовательность переходов и описывается концепцией «эволюции процветания» (*blossoming evolution*) (Ahamer, 2019). Согласно этой теории, помимо преимущественно эволюционной динамики в мировой истории происходят переходы от одной структуры социально-экономической системы к принципиально иной (Christian, 2018). При этом каждая предшествующая система стремится поддерживать внутреннее равновесие до тех пор, пока все же не окажется неустойчивой. Такие системы функционируют в соответствии с теми или иными «естественными законами» (например, «вертикаль власти», демократизм, взаимное уважение, индивидуальная ответственность). Как

показывает история, каждая социально-экономическая система имеет свои принципы, законы и этику (Küstenmacher et al., 2010). Согласно долговременным историческим наблюдениям, несмотря на отдельные (и масштабные) девиации, мир эволюционирует в сторону более демократичного устройства, основанного на диалоге и взаимном уважении, что согласуется с положениями теории «эволюции процветания».

В целом, База данных глобальных изменений (GCDB) предоставляет многофункциональный инструментарий для анализа трендов и перемен в глобальной энергетической системе, позволяющий глубже понять ее динамику. Извлеченные знания помогут наметить пути дальнейшего развития для достижения предпочтительной структуры глобальной энергетики и экономики.

Библиография

- Aхамер Г. (2018) Применение глобальных баз данных в Форсайт-исследованиях энергетики и землепользования: метод GCDB. *Форсайт*, 12(4), 46–61. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.46.61
- Ahamer G. (2008) Virtual Structures for mutual review promote understanding of opposed standpoints. *The Turkish Online Journal of Distance Education*, 9(1), 17–43.
- Ahamer G. (2012) Geo-Referenceable Model for the Transfer of Radioactive Fallout from Sediments to Plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 223(5), 2511–2524. DOI: 10.1007/s11270-011-1044-x
- Ahamer G. (2014) Kon-Tiki: Spatio-temporal maps for socio-economic sustainability. *Journal for Multicultural Education*, 8(3), 206–223. DOI: 10.1108/JME-05-2014-0022
- Ahamer G. (2015) Applying student-generated theories about global change and energy demand. *International Journal of Information and Learning Technology*, 32(5), 258–271. DOI: 10.1108/IJILT-01-2015-0002
- Ahamer G. (2019) *Mapping Global Dynamics. From Local Pollution to Global Evolution*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-51704-9
- Ahamer G. (2021) Can we synthesise different development theories? *Social Evolution and History*, 20(2), 79–108, DOI: 10.30884/seh/2021.02.04
- Ahamer G., Jekel T. (2010) Make a Change by Exchanging Views. In: *Cases on Transnational Learning and Technologically Enabled Environments* (eds. S. Mukerji, P. Tripathi), Hershey, PA: IGI Global, 1–30. DOI: 10.4018/978-1-61520-749-7.ch001
- Ahamer G., Kumpfmüller K.A. (2013) Education and literature for development in responsibility: Partnership hedges globalization. In: *Handbook of Research on Transnational Higher Education* (eds. S. Mukerji, P. Tripathi), Hershey, PA: IGI Global, 526–584. DOI: 10.4018/978-1-4666-4458-8.ch027
- Akaev A., Sadovnichy V., Korotayev A. (2012) On the dynamics of the world demographic transition and financial-economic crises forecasts. *European Physical Journal: Special Topics*, 205(1), 355–373. DOI: 10.1140/epjst/e2012-01578-2
- Bader L., Bereuther T., Deutsch E., Edlinger J., Füreder S., Kaspar E., Köttstorfer M., Mautner C., Rossegger C., Samonig A., Samonig S., Schuster C., Witz G., Zotter V., Ahamer G. (2013) Quality Improvements in Curricula for Global Studies. *Multicultural Education and Technologies Journal*, 7(2/3), 113–126, DOI: 10.1108/17504971311328035
- Bader L., Bereuther T., Deutsch E., Edlinger J., Füreder S., Kaspar E., Köttstorfer M., Mautner C., Rossegger C., Samonig A., Samonig S., Schuster C., Witz G., Zotter V., Rozanov A., Ilyin V., Ahamer G. (2014) Multiparadigmatic Humanities: Curricula for Global Studies. *International Journal of Humanities and Social Science*, 4(6), 314–337. http://www.ijhssnet.com/journals/Vol_4_No_6_1_April_2014/34.pdf and also <https://istina.msu.ru/workers/6530980/>, дата обращения 11.04.2021.
- Baumann M., Kuemmerle T., Elbakidze M., Ozdogan M., Radeloff V.C., Keuler N.S., Prishchepov A.V., Kruhlov I., Hostert P. (2011) Patterns and drivers of post-socialist farmland abandonment in Western Ukraine. *Land Use Policy*, 28(3), 552–562. DOI: 10.1016/j.landusepol.2010.11.003
- Bertalanffy L. (1968) *General System Theory: Foundations, Development, Applications*, New York, NY: Braziller.
- Brans J., Mareschal B. (1994) The PROMCALC & GAIA decision support system for multicriteria decision aid. *Decision Support Systems*, 12(4–5), 297–310. DOI: 10.1016/0167-9236(94)90048-5
- Castells M. (1996) *The Information Age: Economy, Society and Culture*, Cambridge, MA: Blackwell.
- Chen R., Ye C., Cai Y., Xing X., Chen Q. (2014) The impact of rural out-migration on land use transition in China: Past, present and trend. *Land Use Policy*, 40, 101–110. DOI: 10.1016/j.landusepol.2013.10.003
- Christian D. (2005) Macrohistory: The Play of Scales, *Social Evolution & History*, 4(1), 22–59.
- Christian D. (2018) *Origin Story: A Big History of Everything*, New York, Boston, London Little: Brown and Company.
- Du Y., Yang C. (2014) Demographic transition and labour market changes: Implications for economic development in China. *Journal of Economic Surveys*, 28(4), 617–635. DOI: 10.1111/joes.12072
- Duraković E., Feigl B., Fischer B., Fleck C., Galler L.-M., Heinrich J., Kulmer K., Kurzweil B., Scholze M., Sperl R., Unterköfler R., Matzenberger J., Remele K., Ahamer, G. (2012) Dialogic Global Studies for Multicultural Technology Assessment. *Multicultural Education & Technology Journal*, 6(4), 261–286. DOI: 10.1108/17504971211279527
- Estep D. (2002) Constant Relative Rate of Change and the Exponential. In: *Practical Analysis in One Variable. Undergraduate Texts in Mathematics* (eds. S. Axler, F.W. Gehring, K.A. Ribet), Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer. DOI: 10.1007/0-387-22644-3_30
- Fagua J.C., Baggio J.A., Ramsey R.D. (2019) Drivers of forest cover changes in the Chocó-Darien Global Ecoregion of South America. *Ecosphere*, 10(31), e02648. DOI: 10.1002/ecs2.2648
- Feron P.H.M. (2016) Introduction. In: *Absorption-Based Post-combustion Capture of Carbon Dioxide* (ed. P.H.M. Feron), Sawston (UK): Woodhead Publishing, pp. 3–12. DOI: 10.1016/B978-0-08-100514-9.00001-9
- Fischer A.M. (2008) “Population invasion” versus urban exclusion in the Tibetan areas of Western China. *Population and Development Review*, 34(4), 631–662. DOI: 10.1111/j.1728-4457.2008.00244.x

- Fischer K., Hauck G., Boatcă M. (eds.) (2016) *Handbuch Entwicklungsforschung*, Berlin: Springer. <https://www.springer.com/de/book/9783658047894>, дата обращения 18.04.2022.
- Galor O. (2012) The demographic transition: Causes and consequences. *Cliometrica*, 6(1), 1–28. DOI: 10.1007/s11698-011-0062-7
- Grau H.R., Aide M. (2008) Globalization and land-use transitions in Latin America. *Ecology and Society*, 13(2), 16. DOI: 10.5751/ES-02559-130216
- Grechukhina I. (2021) Socio-economic and environmental effects of renewable energy policy in Russia. *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, 15(1–3), 157–170.
- Haggett P. (2001) *Geography – A global synthesis*, Harlow: Pearson Education.
- Hurttt G.C., Chini L.P., Frolking S., Betts R.A., Feddema J., Fischer G., Fisk J.P., Hibbard K., Houghton R.A., Janetos A., Jones C.D., Kindermann G. (2011) Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climatic Change*, 109(1), 117–161. DOI: 10.1007/s10584-011-0153-2
- Hurttt G.C., Frolking S., Fearon M.G., Moore B., Shevliakova E., Malyshev S., Pacala S.W., Houghton R.A. (2006) The underpinnings of land-use history: Three centuries of global gridded land-use transitions, wood-harvest activity, and resulting secondary lands. *Global Change Biology*, 12(7), 1208–1229. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01150.x
- IIASA (1998) *Global Energy Perspectives in 1998* (IIASA/WEC Report), Cambridge (UK): Cambridge University Press. http://www.iiasa.ac.at/cgi-bin/ecs/book_dyn/bookcnt.py, дата обращения 26.03.2022.
- IPCC (2002) *Special Report on Emissions Scenarios (SRES)*, Geneva: International Panel on Climate Change (IPCC). <https://www.ipcc.ch/report/emissions-scenarios/>, дата обращения 14.01.2022.
- IRENA (2017a) *Russia Can Nearly Quadruple Share of Renewable Energy by 2030 Tweet*, Abu Dhabi, Bonn, New York: International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2017/Apr/Russia-Can-Nearly-Quadruple-Share-of-Renewable-Energy-by-2030>, дата обращения 19.04.2022.
- IRENA (2017b) *Renewable Energy Prospects for the Russian Federation* (REmap working paper), Abu Dhabi, Bonn, New York: International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2017/Apr/Renewable-Energy-Prospects-for-the-Russian-Federation-REmap-working-paper>, дата обращения 16.04.2022.
- IRENA (2022) *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*, Abu Dhabi, Bonn, New York: International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>, дата обращения 16.04.2022.
- Jäger J., Springler E. (2012) *Ökonomie der internationalen Entwicklung – Eine kritische Einführung in die Volkswirtschaftslehre* (Series “Geschichte – Entwicklung – Politik”, GEP14), Wien: Mandelbaum.
- Jeniček V. (2010) Population problem in the future - Challenges, questions. *Agricultural Economics*, 56(3), 97–107. DOI: 10.17221/91/2009-AGRICECON
- Kaya Y., Keiichi Y. (1997) *Environment, energy, and economy: Strategies for sustainability*, Tokyo: United Nations University Press. <https://archive.unu.edu/unupress/unupbooks/uu17ee/uu17ee00.htm>
- Kondratieff N. (1984) *Long Wave Cycle*, Boston, MA: E.P. Dutton.
- Kravald Ø., Rindfuss R.R. (2008) Changing relationships between education and fertility: A study of women and men born 1940 to 1964. *American Sociological Review*, 73(5), 854–873. DOI: 10.1177/000312240807300508
- Küstenmacher M., Haberer T., Küstenmacher W.T. (2010) *God 9.0*, Gütersloh (Germany): Gütersloher Verlagshaus. <http://gott90.de/god-9.0-english>, дата обращения 17.02.2022.
- Lambin E.F., Meyfroidt P. (2011) Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *PNAS*, 108(9), 3465–3472. DOI: 10.1073/pnas.1100480108
- Lambin E.F., Meyfroidt P. (2019) Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy*, 27(2), 108–118. DOI: 10.1016/j.landusepol.2009.09.003
- Liao S. (2005) Expert system methodologies and applications—a decade review from 1995 to 2004. *Expert Systems with Applications*, 28(1), 93–103. DOI: 10.1016/j.eswa.2004.08.003
- Long H. (2014) Land consolidation: An indispensable way of spatial restructuring in rural China. *Journal of Geographical Sciences*, 24(2), 211–225. DOI: 10.1007/s11442-014-1083-5
- Long H., Qu Y. (2018) Land use transitions and land management: A mutual feedback perspective. *Land Use Policy*, 74, 111–120. DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.03.021
- Long H., Liu Y., Hou X., Li T., Li Y. (2014) Effects of land use transitions due to rapid urbanization on ecosystem services: Implications for urban planning in the new developing area of China. *Habitat International*, 44, 536–544. DOI: 10.1016/j.habitatint.2014.10.011
- Lovelock J. (1988) *The Ages of Gaia. A Biography of Our Living Earth*, New York, London: W.W. Norton & Co.
- Lu C., Lee T., Chiu C. (2009) Financial time series forecasting using independent component analysis and support vector regression. *Decision Support Systems*, 47(2), 115–125. DOI: 10.1016/j.dss.2009.02.001
- Macedo M.N., DeFries R.S., Morton D.C., Stickler C.M., Galford G.L., Shimabukuro Y.E. (2012) Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. *PNAS*, 109(4), 1341–1346. DOI: 10.1073/pnas.1111374109
- MacHaris C., Turcksin L., Lebeau K. (2012) Multi actor multi criteria analysis (MAMCA) as a tool to support sustainable decisions: State of use. *Decision Support Systems*, 54(1), 610–620. DOI: 10.1016/j.dss.2012.08.008
- Marchetti C., Nakicenovic N. (1979) *The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model* (Report RR-79-13), Laxenburg: Austria International Institute for Applied Systems Analysis. http://www.cesaremarchetti.org/archive/scan/MARCHETTI-028_pt.1.pdf, дата обращения 23.01.2022.
- Mattiussi A., Rosano M., Simeoni P. (2014) A decision support system for sustainable energy supply combining multi-objective and multi-attribute analysis: An Australian case study. *Decision Support Systems*, 57(1), 150–159. DOI: 10.1016/j.dss.2013.08.013
- Meadows D., Meadows D., Randers J., Behrens III W. (1992) *The Limits to Growth*, New York: Universe Books.
- Meyfroidt P., Roy Chowdhury R., de Bremond A., Ellis E.C., Erb K.-H., Filatova T., Garrett R.D., Grove J.M., Heinemann A., Kuemmerle T., Kull C.A., Lambin E.F. (2018) Middle-range theories of land system change. *Global Environmental Change*, 53, 52–67. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2018.08.006
- Mills M., Rindfuss R.R., McDonald P., te Velde E. (2011) Why do people postpone parenthood? reasons and social policy incentives. *Human Reproduction Update*, 17(6), 848–860. DOI: 10.1093/humupd/dmr026

- Munteanu C., Kuemmerle T., Boltiziar M., Butsic V., Gimmi U., Lubos Halada K.D., Király G., Konkoly-Gyuró É., Kozak J., Lieskovský J., Moyses M. (2014) Forest and agricultural land change in the Carpathian region – A meta-analysis of long-term patterns and drivers of change. *Land Use Policy*, 38, 685–697. DOI: 10.1016/j.landusepol.2014.01.012
- Nielsen I., Fang C. (2007) Demographic shift and projected labour shortage in China. *Economic Papers*, 26(3), 231–236. DOI: 10.1111/j.1759-3441.2007.tb00432.x
- Nuissl H., Haase D., Lanzendorf M., Wittmer H. (2009) Environmental impact assessment of urban land use transitions – A context-sensitive approach. *Land Use Policy*, 26(2), 414–424. DOI: 10.1016/j.landusepol.2008.05.006
- Peters G.P., Andrew R.M., Canadell J.G., Fuss S., Jackson R.B., Korsbakken J.I., Le Quéré C., Nakicenovic N. (2017) Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement. *Nature Climate Change*, 7, 118–122. DOI: 10.1038/nclimate3202
- Powers J.S., Corre M.D., Twine T.E., Veldkamp E. (2011) Geographic bias of field observations of soil carbon stocks with tropical land-use changes precludes spatial extrapolation. *PNAS*, 108(15), 6318–6322. DOI: 10.1073/pnas.1016774108
- Raskin P. (2012) Scenes from the Great Transition. *Solutions*, 3(4), 11–17. <https://archive.ph/20130620204841/http://thesolutionsjournal.anu.edu.au/node/1140#selection-209.0-233.11>, дата обращения 16.02.2022.
- Raskin P. (2016) *Journey to Earthland: The Great Transition to Planetary Civilization*, Boston, MA: Tellus Institute.
- Raskin P., Banuri T., Gallopín G., Gutman P., Hammond A., Kates R., Swart R. (2002) *Great Transition: The Promise and Lure of the Times Ahead* (A Report of the Global Scenario Group), Boston, MA: Tellus Institute.
- Raymo J.M., Park H., Xie Y., Yeung W.-J. (2015) Marriage and Family in East Asia: Continuity and Change. *Annual Review of Sociology*, 41(1), 150504162558008. DOI: 10.1146/annurev-soc-073014-112428
- Rounsevell M.D.A., Pedrolí B., Erb K.-H., Gramberger M., Busck A.G., Haberl H., Kristensen S., Kuemmerle T., Lavorel S., Lindner M., Lotze-Campen H., Metzger M.J. (2012) Challenges for land system science. *Land Use Policy*, 29(4), 899–910. DOI: 10.1016/j.landusepol.2012.01.007
- Rubenstein-Montano B., Liebowitz J., Buchwalter J., McCaw D., Newman B., Rebeck K. (2001) A systems thinking framework for knowledge management. *Decision Support Systems*, 31(1), 5–16. DOI: 10.1016/S0167-9236(00)00116-0
- Sayamov Y. (2013) Education as a Global “Soft Power” for Sustainable Development. *Campus-Wide Information Systems*, 30(5), 346–357.
- Seuring S. (2013) A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, 54(4), 1513–1520. DOI: 10.1016/j.dss.2012.05.053
- Shen J., Spence N.A. (1996) Modelling urban-rural population growth in China. *Environment and Planning A*, 28(8), 1417–1444. DOI: 10.1068/a281417
- Ssewamala F.M. (2015) Optimizing the “demographic dividend” in young developing countries: The role of contractual savings and insurance for financing education. *International Journal of Social Welfare*, 24(3), 248–262. DOI: 10.1111/ijsw.12131
- Steiniger S., Bocher E. (2009) An overview on current free and open source desktop GIS developments. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(10), 1345–1370. DOI: 10.1080/13658810802634956
- Sterman J. (2000) *Business Dynamics: Systems thinking and modelling for a complex world*, New York: McGraw Hill.
- Toft M.D. (2007) Population shifts and civil war: A test of power transition theory. *International Interactions*, 33(3), 243–269. DOI: 10.1080/03050620701449025
- Upadhyay U.D., Gipson J.D., Withers M., Lewis S., Ciaraldi E.J., Fraser A., Huchko M.J., Prata N. (2014) Women’s empowerment and fertility: A review of the literature. *Social Science and Medicine*, 115, 111–120. DOI: 10.1016/j.socscimed.2014.06.014
- Vester F., von Hesler A. (1980) *Sensitivitätsmodell. Umweltforschungsplan des Bundesministers des Innern: Ökologie und Planung in Verdichtungsgebieten*, Frankfurt am Main: Regionale Planungsgemeinschaft Untermain.
- Zhang J. (2002) Urbanization, population transition, and growth. *Oxford Economic Papers*, 54(1), 91–117. DOI: 10.1093/oep/54.1.91