

Научная статья. Исторические науки

УДК 339.97

DOI: 10.31696/2072-8271-2025-2-2-67-043-065

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ СТРАН ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

Светлана Сергеевна ВАНИНА ¹

¹ НИУ ВШЭ, Москва, Россия,

svanina@hse.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7583-6801>

Аннотация: На фоне экономических, ресурсных и климатических изменений актуальной задачей мирового сообщества становится разработка новых и актуализация существующих глобальных инициатив, способных стать ответом на современные вызовы. Одним из направлений, которое может оказать существенное влияние на долгосрочное развитие мировой экономики, является развитие водородных технологий. Последствия развития данного направления могут значительно повлиять на страны Юго-Восточной Азии, которые уделяют большое внимание вопросам создания устойчивой и доступной энергетики. В настоящее время на страны региона приходится около 4% общемирового потребления энергии. При этом, начиная с 2010 г. они определяют более 11% прироста мирового спроса на энергию и к 2035 г. данный показатель может превысить 25%. На этом фоне многие государства региона демонстрируют стремление к активному участию в формирующемся глобальном рынке низкоуглеродной энергетики. Вместе с тем актуальным остается вопрос обоснования приоритетных сценариев развития и специализации отдельных стран в рамках складывающихся цепей добавленной стоимости, который требует дополнительного исследования.

Настоящая работа посвящена оценке показателей устойчивого развития стран ЮВА в контексте различных вариантов эволюции водородной энергетики. На основании полученных результатов обосновываются приоритетные направления и проводится их сопоставление с современной политикой стран региона.

Ключевые слова: водородная энергетика, глобальная инициатива, устойчивое развитие, Цели устойчивого развития, страны Юго-Восточной Азии, сценарный анализ, панельная векторная авторегрессия

Для цитирования: Ванина С.С. Влияние водородной энергетики на устойчивое развитие стран Юго-Восточной Азии // Юго-Восточная Азия: актуальные проблемы развития, 2025, Том 2, № 2 (67). С. 43–65. DOI: 10.31696/2072-8271-2025-2-2-67-043-065

THE IMPACT OF HYDROGEN ENERGY ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN SOUTHEAST ASIAN COUNTRIES

Svetlana S. VANINA ¹

¹ HSE University, Moscow, Russia,
svanina@hse.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7583-6801>

Abstract: Against the backdrop of economic, resource, and climate changes, a pressing task for the global community is the development of new and the updating of existing global initiatives capable of addressing contemporary challenges. One area that could significantly impact the long-term development of the global economy is the advancement of hydrogen technologies, which involves replacing fossil energy carriers and storage systems with renewable alternatives. The consequences of this development could profoundly affect Southeast Asian countries, which place great emphasis on building a sustainable and accessible energy sector. Currently, the region accounts for about 4% of global energy consumption. At the same time, since 2010, these countries have contributed over 11% of the growth in global energy demand, and according to stated plans, this figure could exceed 25% by 2035. Against this backdrop, many states in the region demonstrate a strong commitment to actively participating in the emerging global low-carbon energy market. However, the question of justifying priority development scenarios and the specialization of individual countries within evolving value chains remains relevant and requires further research.

This study evaluates sustainable development indicators in Southeast Asian countries within the context of various hydrogen energy evolution scenarios. Based on the findings, priority directions are substantiated and compared with current policies in the region.

Keywords: *hydrogen energy, global initiative, sustainable development, Sustainable Development Goals (SDGs), Southeast Asian countries, scenario analysis, panel vector autoregression (PVAR)*

For citation: Vanina S.S. The Impact of Hydrogen Energy on Sustainable Development in Southeast Asian Countries. *Yugo-Vostochnaya Aziya: aktual'nyye problemy razvitiya*, 2025, T. 2, № 2 (67). Pp. 43–65. DOI: 10.31696/2072-8271-2025-2-2-67-043-065

Характерной чертой современной глобальной энергетики является поиск приоритетных путей развития, основанных на принципах устойчивости, безопасности и экономической эффективности в условиях истощения природных ресурсов, высокой динамики изменения цен на энергоносители и борьбы с выбросами парниковых газов. В ответ на возникающие вызовы мировое сообщество предпринимает шаги по развитию института глобальных инициатив, направленных на достижение долгосрочных экономических, социальных и экологических целей.

Одним из актуальных вопросов для мировой энергетики является увеличение доли устойчивых и доступных альтернатив ископаемым видам топлива, в первую очередь, в секторах с высокой углеродоемкостью и трудной декарбонизацией. В условиях перехода к низкоуглеродной энергетике особое внимание уделяется возобновляемым источникам и технологиям аккумулирования энергии. Возрастает интерес к водороду как возобновляемому накопителю и носителю вторичной энергии, обладающему высоким потенциалом эффективного использования во многих отраслях экономики, и, согласно мнению многих экспертов, представляющему собой необходимый компонент будущей системы достижения целей устойчивого развития (ЦУР).

Глобальная инициатива по развитию водородной энергетики сопровождается внедрением отдельных программ в национальные энергетические стратегии, разработкой международных стандартов и созданием специализированных межгосударственных организаций. Ведущие позиции на формирующемся рынке занимают Германия, Япония, Австралия, США, Китай, в то же время остальные страны также стремятся к приемлемому для них уровню участия в изменяющихся глобальных цепях добавленной стоимости.

Активную позицию в развитии водородного направления занимают страны Юго-Восточной Азии (ЮВА). Несмотря на различия в масштабах экономик, уровне индустриализации и доступности технологий, государства региона формируют собственные водородные стратегии, реализуют пилотные и инфраструктурные проекты по производству, хранению, транспортировке, использованию водорода и его производных. При этом важным условием успеха данных программ для устойчивого развития региона является не только выверенная позиция в отношении технологического и ресурсного развития, но и своевременная подготовка и реализация планов интеграции принимаемых решений в национальную энергетику.

С целью принятия обоснованных решений на национальном и международном уровне актуальной задачей является исследование последствий развития водородной энергетики в части достижения целей устойчивого развития отдельными странами и миром в целом. В настоящей работе проводится анализ сценариев развития глобальной водородной энергетики и количественная оценка влияния их показателей на устойчивое развитие стран ЮВА, обосновываются критерии выбора и приоритетные траектории развития водородной энергетики региона.

Развитие водородной энергетики в странах Юго-Восточной Азии

С начала 2010-х годов в энергетической повестке стран ЮВА прослеживается интерес к водородной энергетике как инструменту декарбонизации и создания устойчивой возобновляемой энергосистемы^{1,2}. Спустя десятилетие начинается институциональное закрепление долгосрочных планов по созданию рынка водорода. Документально водородная повестка региона закрепляется в рамках второго этапа Плана действий АСЕАН по энергетическому сотрудничеству на 2021–2025 гг. (АРАЕС)³, который становится основой для формирования национальных стратегий и дорожных карт по развитию водородного направления в странах ЮВА.

Ввиду различий государств региона по уровню экономического развития, доступа к ресурсной базе и структуре энергетического потребления разработка и принятие планов по развитию водородной энергетики на национальном уровне происходит неравномерно. Наиболее активные шаги принимают Сингапур, Малайзия, Индонезия, Таиланд и Вьетнам, остальные страны ЮВА пока находятся на более ранних этапах ее развития^{4,5}.

Сингапур занимает одну из лидирующих позиций в регионе по переходу на водородные технологии⁶. В 2022 г. государство приняло Национальную водородную стратегию, которая предусматривает развитие исследовательской базы, международного сотрудничества, создание совместимой с водородом инфраструктуры и отработку в рамках пилотных проектов передовых водородных решений. В соответствии с утвержденным планом к 2050 г. около половины потребностей страны в электроэнергии может быть обеспечено за счет водорода и его производных⁷.

В качестве ориентира Малайзии, согласно принятой в 2023 г. Дорожной карте водородной экономики и технологий (HETR), заявлено достижение к 2050 г. лидирующей позиции по производству и экспорту

зеленого водорода на рынке Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР)^{8,9}. Среди планов страны - строительство зеленого водородного центра в Сабахе (10 ГВт)¹⁰ и крупнейшей в Малайзии зелёной водородной электростанции в Пераке (60 МВт), работающей на плавучих солнечных батареях¹¹.

Амбициозные планы отражены в опубликованной в 2023 г. Национальной стратегии по водороду Индонезии, согласно которым государство нацелено на развитие внутреннего водородного рынка и выход на производство около 220 ТВтч электроэнергии на основе водорода к 2060 г., что составляет почти весь объем спроса на сегодняшний день, и экспорт водорода и его производных на мировой рынок^{12,13}.

Согласно стратегии и дорожной карте по водороду Таиланда в ближайшие десятилетия в стране планируется развитие внутреннего рынка водорода, создание водородной инфраструктуры и регуляторной базы, увеличение количества НИОКР. Отдельное внимание уделяется международному сотрудничеству в части обмена опытом и развития цепочек поставок^{14 15}.

В соответствии со Стратегией развития водородной энергетики на период до 2030 г. с перспективой до 2050 г. Вьетнама, принятой в 2024 г., среди планов страны – выход к 2040 г. на ежегодное производство водорода до 20 млн тонн, а также реализация проектов по строительству водородных хабов, производству аммиака и кислорода, интегрированных с крупными солнечными и ветровыми установками, основанных на избыточной возобновляемой электроэнергии^{16,17}.

На Филиппинах, в Брунее, Камбодже, Лаосе и Мьянме переход к развитию водородной энергетики осуществляется менее активными темпами. Утвержденная Дорожная карта по водородной и термоядерной энергетике Филиппин отражает планы по использованию водорода и аммиака в качестве топлива в целях декарбонизации электроэнергетики и транспорта¹⁸. На территории государства разрабатываются инициативы по созданию интегрированного завода для производства водорода¹⁹ и внедрению автономных энергетических систем на водороде на основе ВИЭ²⁰. Бруней участвует в качестве страны-экспортера в пилотном проекте по созданию межстрановой цепочки поставок водорода японской ассоциации по развитию передовых водородных энергетических цепочек (AHEAD), направленном на производство водорода из природного газа с последующим экспортом в Токийский залив^{21,22}. В планы Камбоджи согласно Долгосрочной стратегии достижения углеродной нейтральности входит инвестирование в НИОКР, посвященных развитию водородного направления. Кроме того, страна сотрудничает

с государствами ЮВА по участию в пилотных проектах по выработке водорода на гидроэлектростанциях²³. Лаос разработал Дорожную карту Лаосской НДР по развитию экологически чистого водорода и аммиака, в которой отражены планы по производству удобрений и чистого топлива на основе избыточной гидроэлектроэнергии²⁴. В Мьянме на текущий момент отсутствуют официальные стратегии по развитию водородной энергетики, однако страна обладает потенциалом в данном направлении благодаря обилию возобновляемых ресурсов и наличию необходимых инфраструктурных условий²⁵.

Наряду с высоким интересом стран региона в области развития водородного направления, необходимыми условиями его успеха является актуализация нормативно-правовой базы, развитие инфраструктуры, трансформация цепей поставок и технологического трансфера, поддержка научно-исследовательской деятельности²⁶. В то же время данная инициатива требует комплексной оценки ее воздействия на существующее экономическое, социальное, внутри- и внешнеполитическое развитие стран ЮВА и региона в целом. В качестве результирующих показателей при проведении анализа могут быть использованы общепринятые композитные индексы устойчивого развития и их компоненты, отражающие прогресс в достижении ЦУР и позволяющие оценить мультидисциплинарные эффекты реализации водородных стратегий.

Оценка влияния водородной энергетики на показатели достижения целей устойчивого развития

Согласно определению, представленному в докладе Всемирной комиссии по окружающей среде и развитию (Комиссии Брундтланд), «устойчивое развитие» определяется как «развитие, которое отвечает потребностям настоящего времени, не ставя под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности»²⁷. Первоначально концепция устойчивого развития основывалась на сбалансированном взаимодействии трех компонентов: экономического роста, социальной инклюзии и охраны окружающей среды²⁸. Принятая в 2015 г. ООН повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 г., включает 17 Целей устойчивого развития, направленных на обеспечение устойчивого социально-экономического развития, охрану окружающей среды и укрепление институтов на глобальном и национальном уровнях²⁹. В настоящее время концепция устойчивого

развития рассматривается в качестве рекомендуемого ориентира для принятия решений на национальном и международном уровне. Для количественной оценки используется система индикаторов, которые позволяют отслеживать динамику, выявлять структурные пробелы и корректировать направления политики на основе сопоставимых показателей.

Результаты реализации инициатив в рамках достижения ЦУР демонстрируют высокую чувствительность к региональному контексту и возможным трансформациям на глобальном уровне. Данный факт усложняет выработку универсальных стратегий и требует учета структурных особенностей каждой страны при проведении оценок и определении приоритетных траекторий развития.

С целью учета региональных особенностей в настоящем исследовании была выполнена группировка стран по четырем секторам по уровню экономического развития и объемам производства первичных источников энергии. Индикатором экономического развития определен показатель ВВП на душу населения по ППС, в качестве энергетического показателя принято производство первичных ископаемых видов топлива на душу населения в единицах мощности. К первому и второму сектору относятся развитые страны с ВВП на душу населения выше 37040 международных долларов 2021 г. по ППС, состав которых определен в соответствии с классификацией Л.М. Григорьева³⁰, а страны второго и третьего сектора характеризуются уровнем производства первичных углеводородных ресурсов, превышающим 10 ТВтч на душу населения, остальные секторы характеризуются более низкими значениями по обоим показателям. В первом секторе представлены в основном государства-члены ЕС (16 стран), второй сектор включает 30 стран, среди которых Россия, Саудовская Аравия, Япония, Великобритания, США; состав третьего сектора формирует 57 государств, включая Китай и Индию; в четвертый сектор входят отдельные страны Африки и часть островных государств, суммарно сектор включает 57 стран. Страны ЮВА представлены во всех четырёх секторах, однако большинство находится в третьем секторе. В составе первого сектора представлен Сингапур, второго – Бруней, к третьему относятся

Малайзия, Таиланд, Индонезия, Вьетнам, Филиппины, Лаос, Мьянма, в четвертом секторе представлена Камбоджа.

Используемый подход обеспечивает сопоставимость данных, учитывает межстрановые различия и позволяет проводить оценку влияния развития водородной энергетики на достижение ЦУР в зависимости от стартовых экономико-энергетических условий, что актуально для анализа степени адаптивности различных стран к внедрению водородных технологий и прогнозирования системного эффекта от их развития.

Предпосылки развития водородной энергетики в странах ЮВА во многом определяются складывающимися общемировыми трендами, вместе с тем существующие прогнозы динамики глобального водородного направления представлены широким набором различающихся вариантов. Для проведения оценки влияния водородной энергетики на достижение ЦУР в работе используется сценарный анализ общемировых тенденций, опирающийся на принципы векторной интерпретации оценки влияния глобальных инициатив на достижения базовых целевых показателей^{31,32,33}. В принятом подходе переменные, характеризующие развитие водородной энергетики, рассматриваются в качестве компонентов вектора, определяющего каждый из сценариев ее развития. В исследовании анализируются три характерных сценария, которые отличаются структурой первичных источников энергии и объемами ежегодной выработки водорода. Показатели производства водорода, как накопителя и энергоносителя, учитываются в качестве дополнительной составляющей энергобаланса так как характеризуют вторичную генерацию, которая основана на использовании первичных источников. Сценарии определены как консервативный, эволюционный и ускоренный (рис. 1–3).

Консервативный сценарий характеризуется переходом к водороду при условии существенного повышения издержек на использование ископаемых ресурсов. Согласно сценарию, глобальное развитие водородных технологий в ближайшие десятилетия ограничено и концентрируется в странах с высоким уровнем технологического развития и политическими обязательствами по сокращению выбросов.

Эволюционный сценарий ориентирован на постепенное формирование глобальной водородной инфраструктуры через внедрение и апробацию технологических решений в ключевых секторах экономики. Осуществляется плавный рост производства водорода и его производных на фоне расширенного применения низкоуглеродных и возобновляемых источников энергии, наращивания производства накопителей энергии, инвестиций в исследования и разработки, плавное вовлечение большинства стран с учетом особенностей национального развития.

Ускоренный сценарий предполагает активное и масштабное внедрение водородных технологий в сжатые сроки за счет значительных государственных и частных инвестиций, высоко динамичную трансформацию глобальных цепей поставок и системную поддержку в рамках международной климатической повестки. В данном сценарии водород на горизонте ближайших десятилетий становится одним из ключевых компонентом энергобаланса, дополняя и во многом вытесняя существующие источники энергии, в первую очередь, уголь, нефть, газ.

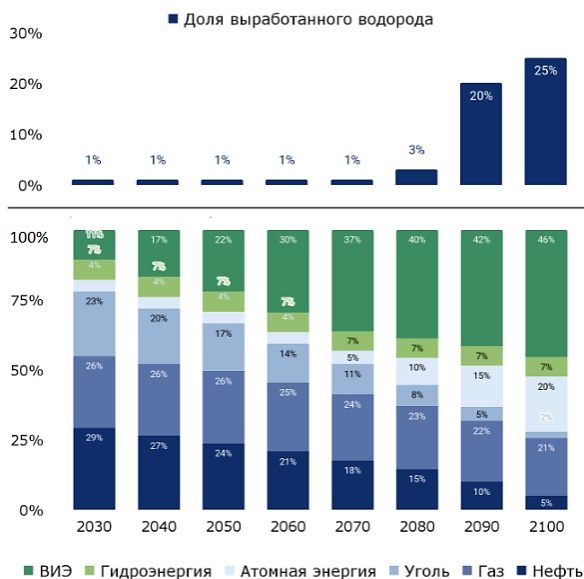


Рис. 1. Консервативный сценарий развития водородной энергетики в период 2030–2100 гг. [расчеты автора]

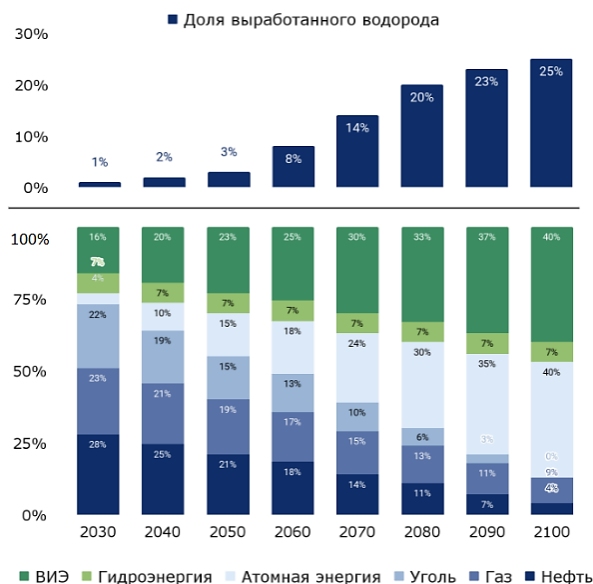


Рис. 2. Эволюционный сценарий развития водородной энергетики в период 2030–2100 гг. [расчеты автора]

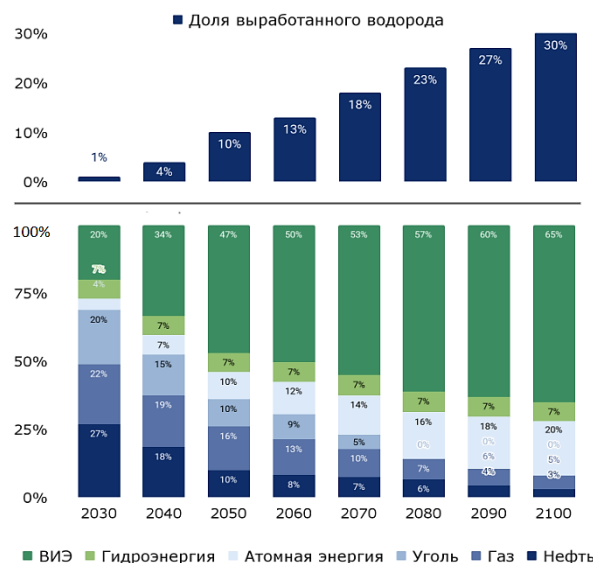


Рис. 3. Ускоренный сценарий развития водородной энергетики в период 2030–2100 гг. [расчеты автора]

Рассматриваемые сценарии развития водородной энергетики охватывают период с 2030 по 2100 г. и описываются внешними прогнозными и расчетными показателями. К показателям внешней среды относятся доли первичных источников энергии в мировом энергобалансе (углеводородные, атомные и возобновляемые энергоисточники), к расчетным – средневзвешенная стоимость энергии и объемы потребления накопителей вторичной энергии. Совокупность используемых переменных определяет вектор развития водородной энергетики. Оценка достижения устойчивого развития осуществляется на основе индекса ЦУР – интегрального показателя, отражающего прогресс по 17 целям.

Для оценки влияния развития водородной энергетики на индекс ЦУР в качестве лучших спецификаций по показателям качества определены динамические панельные модели с фиксированными эффектами, построенные для каждого из четырех рассматриваемых секторов. Полученные результаты отражают статистическую значимость влияния развития атомной и возобновляемой энергетики на индекс ЦУР, который, помимо обозначенного, характеризуется высокой инерционностью.

С целью выявления зависимостей между развитием водородного направления и компонентами индекса ЦУР, включающего более ста показателей (в отчете 2025 г. отражено 102 глобальных показателя и 24 дополнительных³⁴) на первом этапе проводится сравнительный корреляционный анализ показателей индекса ЦУР и альтернативных агрегированных показателей, методики расчета которых включают меньшее количество компонентов. На основе полученных результатов для оценки влияния развития водородной энергетики на компоненты индекса ЦУР на следующих этапах используется индекс человеческого развития (ИЧР), который характеризуется высокой степенью корреляции с индексом ЦУР (коэффициент Пирсона = 0,899). ИЧР включает четыре компонента, отражающих уровень жизни населения: ожидаемая продолжительность жизни (*LE*), средняя продолжительность обучения населения (*MYS*), ожидаемая продолжительность обучения населения, ещё получающего образование (*EYS*), ВНД на душу населения по ППС (*GNIpc*). ИЧР рассчитывается по следующей формуле (1)³⁵:

$$HDI = \sqrt[3]{I_{Life} * I_{Education} * I_{Income}} , \quad (1)$$

где

I_{Life} – индекс ожидаемой продолжительности жизни;

$I_{Education}$ – индекс образования;

I_{Income} – индекс дохода.

Оценка влияния переменных вектора сценариев на компоненты ИЧР выполняется с использованием панельной векторной авторегрессионной модели с экзогенными переменными (PVARX). Компоненты индекса (LE, MYS, EYS, GNIpc) используются в модели в качестве эндогенных переменных, что позволяет выявить взаимное влияние между ними. В состав экзогенных переменных входят объемы производства первичных углеводородных (Fos), возобновляемых (RES) и атомных (Nuc) источников энергии, средневзвешенная стоимость энергии (Cost), объемы производства накопителей вторичной энергии (Stor). Модели строятся для каждого сектора, рассматриваемый период - 53 г. с 1971 по 2023 год. По результатам сравнительного анализа моделей с различными спецификациями лучшие показатели качества соответствуют модели с двумя лагами эндогенных переменных и текущими значениями экзогенных переменных. На основе данной модели проводится дальнейшее исследование (2).

$$\Delta Y_{it} = A_1 \Delta Y_{it-1} + A_2 \Delta Y_{it-2} + B \Delta X_{it} + u_i + \varepsilon_{it} , \quad (2)$$

где

$\Delta Y_{it} = [\Delta LE_{it}, \Delta MYS_{it}, \Delta EYS_{it}, \Delta GNIpc_{it}]^T$ – вектор эндогенных переменных;

$\Delta X_{it} = [\Delta Fos_{it}, \Delta Nuc_{it}, \Delta RES_{it}, \Delta Cost_{it}, \Delta Stor_{it}]^T$ – вектор экзогенных переменных;

A_1, A_2 – матрицы коэффициентов для лагов эндогенных переменных;

B – матрица коэффициентов для экзогенных переменных;

u_i – фиксированные эффекты стран;

ε_{it} – вектор ошибок.

Согласно полученным результатам (рис. 4–7) во всех секторах значения компонентов ИЧР для рассматриваемых стран имеют значимую внутреннюю взаимосвязь. В странах первого и второго сектора наблюдаются статистически значимые зависимости между компонентами ИЧР и объемами производства всех рассматриваемых первичных энергоисточников, в странах третьего сектора - с производством первичных ископаемых и возобновляемых источников и стоимостью

энергии; страны четвертого сектора имеют значимую связь с углеводородными энергоисточниками; во 2-4-ом секторах присутствует статистически значимая связь между отдельными компонентами ИЧР и накопителями вторичной энергии.

Fixed Effects OLS Panel VAR estimation

Transformation: none
Group variable: country
Time variable: year
Number of observations = 832
Number of groups = 16
Obs per group: min = 52
 avg = 52
 max = 52

	demeaned_LE	demeaned_MYS	demeaned_EYS	demeaned_GNIpc
demeaned_lag1_LE	-0.1295 ** (0.0412)	-0.0055 (0.0156)	-0.0271 (0.0403)	-293.1166 (263.0103)
demeaned_lag1_MYS	-0.1594 (0.0976)	0.0726 * (0.0370)	-0.0172 (0.0954)	-1877.2535 ** (622.9822)
demeaned_lag1_EYS	0.1082 ** (0.0382)	-0.0002 (0.0145)	0.1433 *** (0.0373)	132.8270 (243.7312)
demeaned_lag1_GNIpc	0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.1511 *** (0.0348)
demeaned_lag2_LE	-0.1401 ** (0.0434)	-0.0231 (0.0164)	0.0240 (0.0424)	-229.4307 (276.6977)
demeaned_lag2_MYS	0.0759 (0.0979)	0.0435 (0.0371)	0.0064 (0.0957)	304.2494 (624.7337)
demeaned_lag2_EYS	-0.0635 (0.0387)	-0.0065 (0.0147)	-0.0073 (0.0378)	492.7429 * (246.9973)
demeaned_lag2_GNIpc	0.0000 (0.0000)	0.0000 ** (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.2687 *** (0.0352)
demeaned_Fos	0.0000 *** (0.0000)	0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	0.0620 *** (0.0121)
demeaned_Nuc	0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	0.1821 * (0.0920)
demeaned_RES	-0.0001 *** (0.0000)	-0.0000 *** (0.0000)	-0.0001 ** (0.0000)	-0.1553 (0.1129)
demeaned_Cost	-0.0007 (0.0064)	-0.0014 (0.0024)	-0.0074 (0.0063)	61.1718 (40.8363)
demeaned_Stor	-0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	0.0114 (0.0117)

*** p < 0.001; ** p < 0.01; * p < 0.05

Рис. 4. Результаты оценки взаимосвязей между переменными сценариев развития водородной энергетики и компонентами ИЧР 1-го сектора на основе PVAR-модели. [расчеты автора]

Fixed Effects OLS Panel VAR estimation

Transformation: none
 Group variable: country
 Time variable: year
 Number of observations = 1560
 Number of groups = 30
 Obs per group: min = 52
 avg = 52
 max = 52

	demeaned_LE	demeaned_MYS	demeaned_EYS	demeaned_GNIpc
demeaned_lag1_LE	0.0886 ** (0.0286)	0.0077 (0.0090)	0.0157 (0.0224)	-179.9022 (122.8381)
demeaned_lag1_MYS	0.0471 (0.0845)	0.1903 *** (0.0266)	0.1289 (0.0664)	276.1933 (363.6247)
demeaned_lag1_EYS	0.0661 (0.0340)	-0.0108 (0.0107)	0.0892 *** (0.0267)	27.3672 (146.1671)
demeaned_lag1_GNIpc	-0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	0.2660 *** (0.0268)
demeaned_lag2_LE	-0.0063 (0.0326)	-0.0081 (0.0103)	0.0220 (0.0256)	-218.5074 (140.2114)
demeaned_lag2_MYS	-0.2021 * (0.0852)	0.0191 (0.0269)	0.0191 (0.0669)	-508.8056 (366.4308)
demeaned_lag2_EYS	-0.0971 ** (0.0343)	0.0034 (0.0108)	-0.0181 (0.0270)	36.5701 (147.6335)
demeaned_lag2_GNIpc	-0.0000 (0.0000)	0.0000 * (0.0000)	0.0000 * (0.0000)	-0.0854 ** (0.0275)
demeaned_Fos	0.0000 *** (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	0.0000 * (0.0000)	0.0568 *** (0.0068)
demeaned_Nuc	0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	0.1598 ** (0.0528)
demeaned_RES	-0.0001 *** (0.0000)	-0.0000 *** (0.0000)	-0.0000 ** (0.0000)	-0.0560 (0.0634)
demeaned_Cost	-0.0042 (0.0054)	-0.0015 (0.0017)	-0.0039 (0.0042)	35.2774 (23.0690)
demeaned_Stor	-0.0000 (0.0000)	0.0000 ** (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	0.0074 (0.0067)

*** p < 0.001; ** p < 0.01; * p < 0.05

Рис. 5. Результаты оценки взаимосвязей между переменными сценариев развития водородной энергетики и компонентами ИЧР 2-го сектора на основе PVAR-модели. [расчеты автора]

Fixed Effects OLS Panel VAR estimation

Transformation: none

Group variable: country

Time variable: year

Number of observations = 2964

Number of groups = 57

Obs per group: min = 52

avg = 52

max = 52

	demeaned_LE	demeaned_MYS	demeaned_EYS	demeaned_GNIpc
demeaned_lag1_LE	0.0736 *** (0.0196)	0.0011 (0.0028)	0.0187 *** (0.0052)	14.9037 (17.4437)
demeaned_lag1_MYS	-0.0124 (0.1366)	0.1473 *** (0.0197)	0.0633 (0.0361)	79.3008 (121.3746)
demeaned_lag1_EYS	0.1447 * (0.0738)	0.0123 (0.0106)	0.1244 *** (0.0195)	110.9920 (65.5751)
demeaned_lag1_GNIpc	-0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	-0.2062 *** (0.0197)
demeaned_lag2_LE	-0.2087 *** (0.0207)	-0.0003 (0.0030)	-0.0035 (0.0055)	29.1655 (18.3772)
demeaned_lag2_MYS	-0.2523 (0.1413)	0.0246 (0.0204)	0.0500 (0.0373)	74.4738 (125.6264)
demeaned_lag2_EYS	-0.0451 (0.0743)	0.0204 (0.0107)	0.0141 (0.0196)	-38.0958 (66.0506)
demeaned_lag2_GNIpc	0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	-0.0000 * (0.0000)	-0.0246 (0.0205)
demeaned_Fos	0.0000 *** (0.0000)	0.0000 (0.0000)	0.0000 ** (0.0000)	0.0152 *** (0.0023)
demeaned_Nuc	0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	0.0256 (0.0178)
demeaned_RES	-0.0001 *** (0.0000)	-0.0000 *** (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	0.0109 (0.0212)
demeaned_Cost	-0.0179 * (0.0089)	-0.0029 * (0.0013)	0.0020 (0.0023)	4.3345 (7.8823)
demeaned_Stor	-0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	-0.0000 * (0.0000)	-0.0017 (0.0023)

*** p < 0.001; ** p < 0.01; * p < 0.05

Рис. 6. Результаты оценки взаимосвязей между переменными сценариев развития водородной энергетики и компонентами ИЧР 3-го сектора на основе PVAR-модели. [расчеты автора]

 Fixed Effects OLS Panel VAR estimation

Transformation: none
 Group variable: country
 Time variable: year
 Number of observations = 2964
 Number of groups = 57
 Obs per group: min = 52
 avg = 52
 max = 52

	demeaned_LE	demeaned_MYS	demeaned_EYS	demeaned_GNIpc
demeaned_lag1_LE	-0.3720 *** (0.0197)	0.0470 *** (0.0066)	-0.0426 *** (0.0042)	566.8563 *** (16.0121)
demeaned_lag1_MYS	-0.5026 *** (0.0453)	-0.6403 *** (0.0153)	-0.1738 *** (0.0096)	40.0573 (36.7937)
demeaned_lag1_EYS	-1.5369 *** (0.0823)	0.0456 (0.0277)	-0.2870 *** (0.0175)	-1349.8795 *** (66.8446)
demeaned_lag1_GNIpc	0.0003 *** (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	0.0000 *** (0.0000)	-0.2519 *** (0.0194)
demeaned_lag2_LE	-0.3338 *** (0.0203)	-0.0446 *** (0.0069)	0.0217 *** (0.0043)	103.0704 *** (16.5261)
demeaned_lag2_MYS	0.1682 *** (0.0438)	-0.0502 *** (0.0148)	0.0159 (0.0093)	-348.0151 *** (35.6262)
demeaned_lag2_EYS	0.8096 *** (0.0869)	0.0706 * (0.0293)	-0.0852 *** (0.0185)	1196.0585 *** (70.5809)
demeaned_lag2_GNIpc	-0.0009 *** (0.0000)	-0.0006 *** (0.0000)	-0.0003 *** (0.0000)	-0.5707 *** (0.0146)
demeaned_Fos	0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	0.0092 * (0.0047)
demeaned_Nuc	-0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	0.0656 (0.0359)
demeaned_RES	0.0000 (0.0001)	0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	0.0269 (0.0427)
demeaned_Cost	0.0010 (0.0196)	0.0019 (0.0066)	0.0009 (0.0042)	12.4178 (15.8924)
demeaned_Stor	-0.0000 * (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.0000 ** (0.0000)	-0.0026 (0.0046)

=====

*** p < 0.001; ** p < 0.01; * p < 0.05

Рис. 7. Результаты оценки взаимосвязей между переменными сценариев развития водородной энергетики и компонентами ИЧР 4-го сектора на основе PVAR-модели. [расчеты автора]

На основе полученных зависимостей выполняется прогнозирование до 2100 года. Эндогенные переменные рассчитываются с использованием разработанных моделей, экзогенные - задаются параметрами рассматриваемых характерных сценариев развития водородной энергетики. Результатами являются три траектории, которые соответствуют анализируемым сценариям и различаются по степени и специфике достижения устойчивого развития различными группами стран.

На рис. 8–10 представлено ожидаемое изменение положений стран каждого из четырех анализируемых секторов к 2100 г. в условиях реализации различных сценариев развития водородной энергетики. По вертикальной оси отражены прогнозируемые объемы производства первичных источников энергии, по горизонтальной - ВНД на душу населения.

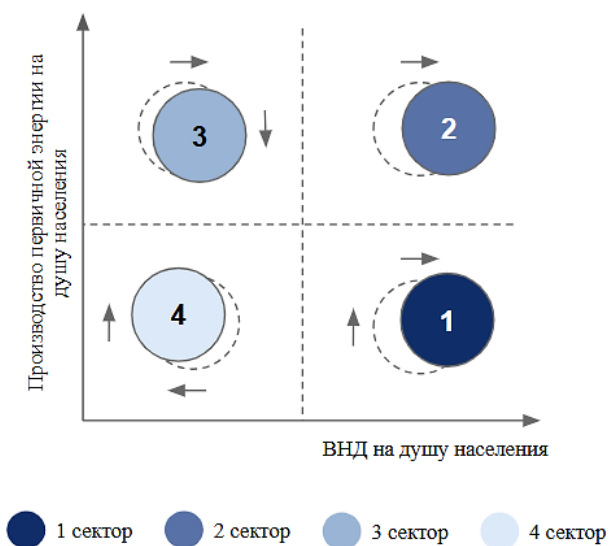


Рис. 8. Изменение положения секторов в консервативном сценарии развития водородной энергетики к 2100 году. [расчеты автора]

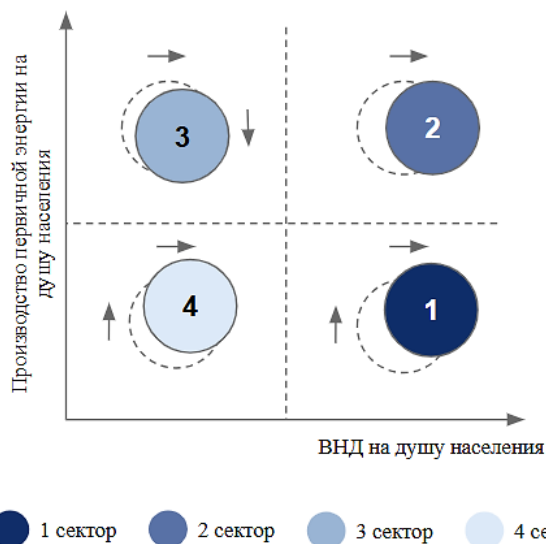


Рис. 9. Изменение положения секторов в эволюционном сценарии развития водородной энергетики к 2100 году. [расчеты автора]

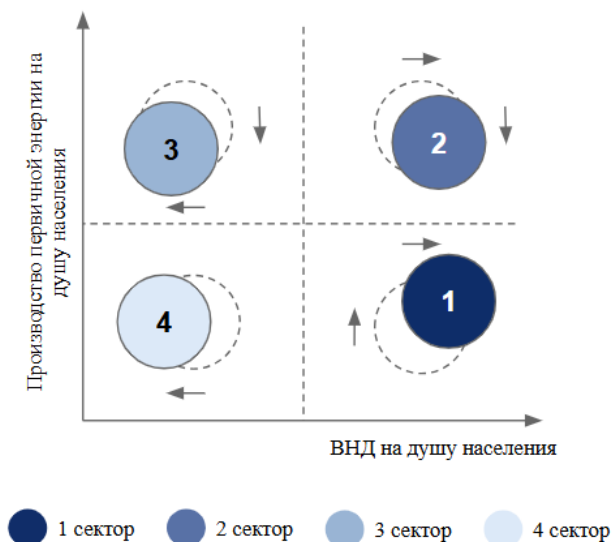


Рис. 10. Изменение положения секторов в ускоренном сценарии развития водородной энергетики к 2100 году. [расчеты автора]

Результаты моделирования влияния различных сценариев развития водородной энергетики на компоненты ИЧР демонстрируют неоднородные социально-экономические последствия для различных групп стран.

В рамках консервативного сценария, предполагающего переход к водородным технологиям только после значительного повышения стоимости ископаемых ресурсов, наблюдается перераспределение доходов к 2100 г. в пользу развитых стран. Они обладают институциональными и инвестиционными возможностями для более быстрой адаптации и активного финансирования водородных решений. В то же время развивающиеся страны, не имеющие достаточного времени и ресурсов для внедрения собственных водородных технологий, сталкиваются с рисками усиления экономического отставания.

Ускоренный сценарий, основанный на активном и масштабном внедрении водородных технологий в ближайшие десятилетия за счет значительных государственных и частных инвестиций, формирования глобальных цепочек поставок и институциональной поддержки в рамках международной климатической повестки, предполагает наибольшие выгоды для стран первого сектора. Эти государства, обладающие существенными заделами по компетенциям в области водородных технологий, способны конвертировать технологическое лидерство в устойчивый экономический рост. В то же время для стран-экспортеров ископаемых энергоресурсов прогнозируется снижение объемов их производства вследствие структурного сдвига спроса в сторону возобновляемых источников. Развивающиеся страны, не располагающие необходимыми ресурсами, будут вынуждены импортировать дорогостоящие водородные технологии, что негативно отразится на уровне доходов населения по сравнению с традиционными углеводородными решениями.

Эволюционный сценарий, предусматривающий постепенное формирование глобальной водородной инфраструктуры, внедрения и апробации технологий в ключевых секторах экономики, обеспечивает более плавный переход от традиционных энергетических источников к водородной энергетике. Реализация данного сценария способствует смягчению экономических рисков, создает возможности для адаптации широкого круга стран к меняющейся энергетической системе и позволяет им выработать собственные стратегии участия в глобальном водородном рынке, что в целом обеспечивает наилучшие показатели по большинству компонентов ИЧР.

Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что страны Юго-Восточной Азии проводят взвешенную и стратегически продуманную политику в развитии национальной водородной экономики. Такой подход обеспечивает им гибкость для адаптации к изменениям на мировом энергорынке. Среди возможных сценариев (консервативного, эволюционного и ускоренного) именно постепенное развитие водородной энергетики наиболее выгодно для региона: оно снижает риски социально-экономических дисбалансов и создает основу для устойчивой интеграции в глобальную водородную экономику в долгосрочном периоде.

Выводы

В условиях масштабных геополитических трансформаций для большинства стран усложняется задача разработки стратегических программ, способствующих росту конкурентоспособности национальных экономик и достижения ЦУР. На этом фоне возрастает актуальность поиска сбалансированных решений в энергетическом секторе, призванных обеспечить доступность эффективных источников энергии и содействовать устойчивому развитию.

Широко обсуждаемая повестка декарбонизации энергетики определяет значимость развития ВИЭ и технологий аккумулирования энергии. Водород рассматривается как перспективный возобновляемый энергоноситель и накопитель, способный обеспечить эффективное энергоснабжение различных отраслей. Согласно многим экспертным оценкам, его внедрение является необходимым условием для обеспечения глобального устойчивого развития.

Учитывая, что страны Юго-Восточной Азии уделяют большое внимание вопросам создания системы устойчивой и доступной энергетики, развитие водородного направления может оказать существенное влияние на реализацию их планов в данной области.

Представленные результаты исследования, основанные на использовании сценарного и эконометрического анализа развития энергетики, позволяют сделать вывод, что страны Юго-Восточной Азии в настоящее время занимают сбалансированную и стратегически обоснованную позицию в отношении формирования национального сегмента водородной экономики, которая дает им возможность поступательно адаптироваться к возможным изменениям на глобальном энергетическом рынке. При этом реализация на мировом уровне эволюционного сценария развития водородной энергетики будет наиболее благоприятной для стран ЮВА по сравнению с консервативным и ускоренным

сценариями, позволит им минимизировать потенциальные социально-экономические потери, одновременно создавая базу для устойчивого включения в глобальный рынок водорода в долгосрочной перспективе.

В качестве направления дальнейшего развития представленного исследования планируется проведение анализа расширенного набора комбинаций параметров сценариев на основе комплекса панельных моделей, математическая формализация и решение задачи оптимизации для обоснования наилучших сценариев, обеспечивающих достижение ЦУР в отдельных странах, регионах, секторах и мире в целом, а также применение полученных результатов для решения прикладных задач в составе методик обоснования приоритетных сценариев глобальных инициатив для достижения ЦУР.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ВАНИНА Светлана Сергеевна, аспирант,
НИУ ВШЭ, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 30.04.2025;
одобрена после рецензирования 16.05.2025;
принята к публикации 30.05.2025.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Svetlana S. VANINA, PhD Student, HSE
University, Moscow, Russia

The article was submitted 30.04.2025;
approved 16.05.2025;
accepted to publication 30.05.2025.

¹ Oh T. H., Pang S. Y., Chua S. C. Energy policy and alternative energy in Malaysia: Issues and challenges for sustainable growth // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. Vol. 14(4). P. 1241–1252.

² Pudukudy M. et al. Renewable hydrogen economy in Asia – Opportunities and challenges: An overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 30(C). P. 743–757.

³ ASEAN Plan of Action for Energy Cooperation (APAEC) 2016–2025: Phase II: 2021–2025.

ASEAN, 2020. URL: <https://asean.org/wp-content/uploads/2023/04/ASEAN-Plan-of-Action-for-Energy-Cooperation-APAEC-2016-2025-Phase-II-2021-2025.pdf> (дата обращения: 01.07.2024).

⁴ APERC Hydrogen Report 2024. APERC, 2025. URL:

https://aperc.or.jp/file/2025/3/18/APERC_Hydrogen_Report_2024_final.pdf

⁵ Li Y. et al. A strategic roadmap for ASEAN to develop hydrogen energy: Economic prospects and carbon emission reduction // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48(30). P. 11113–11130.

⁶ Tuli V. Asia leads decarbonisation push to build green hydrogen economy // The Business Times. 2025. URL: <https://www.businesstimes.com.sg/esg/asia-leads-decarbonisation-push-build-green-hydrogen-economy>

⁷ Singapore's National Hydrogen Strategy. Ministry of Trade and Industry Singapore, 2022. URL: https://www.mti.gov.sg/-/media/MTI/HPO/Singapore-Hydrogen-Strategy/brochure_SG_National_Hydrogen_Strategy_lowres.pdf

⁸ Lim E.-L., Sim X., Hutchinson G. Malaysia publishes its National Energy Transition Roadmap and Hydrogen Economy and Technology Roadmap // Linklaters. 2023. URL: <https://sustainablefutures.linklaters.com/post/102irim/malaysia-publishes-its-national-energy-transition-roadmap-and-hydrogen-economy-an>

⁹ Hydrogen Economy and Technology Roadmap (HETR) 2022–2030. NNC, MOSTI, 2024. URL: <https://apcct.org/sites/default/files/2024-11/Ismarul%2C%20Malaysia%20PPT%20HETR.pdf>

¹⁰ Malaysia's LBS-led Consortium to Build 10GW Green Hydrogen Hub // Gas Ecosphere. 2024. URL: <https://en.igascn.com/global/detail/?TypeId=1037&Id=9259&SortSource=list>

- ¹¹ Martin P. Malaysia's largest green hydrogen project to begin construction this year after closing \$400m in finance // Hydrogen Insight. 2024. URL: <https://www.hydrogen-insight.com/production/malaysia's-largest-green-hydrogen-project-to-begin-construction-this-year-after-closing-400m-in-finance/2-1-1602253>
- ¹² Saria L. Indonesia's National Hydrogen Strategy. Ministry of Energy and Mineral Resources of Indonesia, 2024. URL: https://henca-tokyo.metro.tokyo.lg.jp/data/Ministry_of_Energy_and_Mineral_Resources_of_the_Republic_of_Indonesia.pdf
- ¹³ IFHE, BRIN. Indonesia Hydrogen Roadmap // IFHE Press. 2023. URL: <https://ifhe.or.id/wp-content/uploads/2023/06/Indonesia%20hydrogen%20roadmap.pdf>
- ¹⁴ Wongkot W. Thailand Hydrogen Strategy & Roadmap. Chiang Mai University, 2024. URL: https://apecctf.org/wp-content/uploads/2024/09/3_Wongkot_20240830_APEC_forsight_Strategic-insights-Navigating-hydrogen.pdf
- ¹⁵ Four Thai – U.S. leading organizations to develop hydrogen technologies as alternative energy, moving towards Thailand's carbon neutrality goal // EGAT. 2021. URL: <https://www.egat.co.th/home/en/20211222e2/>
- ¹⁶ Vietnam's Hydrogen Energy Development Strategy and LNG Power Development Plan in line with the National Energy Master Plan. Ministry of Industry and Trade (MOIT), 2024. URL: https://vepg.vn/wp-content/uploads/2024/05/1_EN_MOIT-Presentation-on-LNG-and-Hydrogen_23-May_KE2.pdf
- ¹⁷ Nguyen Tuong Private firm to build Vietnam's first hydrogen plant with \$840 mln // The Investor. 2022. URL: <https://theinvestor.vn/private-firm-to-build-vietnam's-first-hydrogen-plant-with-840-mln-d515.html>
- ¹⁸ Philippines Energy Hydrogen-Ammonia Roadmap // International Trade Administration. 2024. URL: <https://www.trade.gov/market-intelligence/philippines-energy-hydrogen-ammonia-roadmap>
- ¹⁹ Pilipinas Shell. First Integrated Hydrogen Manufacturing Facility in the Philippines // Shell Pilipinas Annual and Sustainability Report 2019. 2020. URL: <https://pilipinas.shell.com/ph/sustainability/pilipinas-shell-annual-sustainability-report-2019/first-integrated-hydrogen-manufacturing-facility.html> (дата обращения: 01.07.2024).
- ²⁰ METI selects Toshiba H2One project for Indonesia, Philippines // Fuel Cells Bulletin. 2018. Vol. 2018(10). P. 8.
- ²¹ Takeo Kumagai AHEAD launches Brunei-Japan hydrogen supply chain for power generation in Tokyo Bay // S&P Global. 2020. URL: <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/natural-gas/062520-ahead-launches-brunei-japan-hydrogen-supply-chain-for-power-generation-in-tokyo-bay>
- ²² Department of Energy at the Prime Minister's Office. Brunei's Energy Transition // EGNRET. 2025. URL: <https://www.egnret.ewg.apec.org/Upload/20250523132348221c231.pdf>
- ²³ The Kingdom of Cambodia. Long-Term Strategy for Carbon Neutrality // United Nations. 2021. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/KHM_LTS_Dec2021.pdf
- ²⁴ Ministry of Energy and Mines. Lao PDR National Green Hydrogen and Ammonia Roadmap // Climate Compatible Growth. 2024. URL: https://climatecompatiblegrowth.com/wp-content/uploads/Report-Final-Draft_Signed-01-1.pdf
- ²⁵ The Government of the Republic of the Union of Myanmar NEMC. Myanmar Energy Master Plan. 2015. URL: https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/1_2015-12-Myanmar_Energy_Master_Plan_red-2.pdf
- ²⁶ IEA. Global Hydrogen Review 2023. 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- ²⁷ World Commission on Environment and Development (WCED). Our Common Future: report of the Brundtland Commission. — Oxford: Oxford University Press, 1987. — URL: <https://www.are.admin.ch/are/en/home/media/publications/sustainable-development/brundtland-report.html>
- ²⁸ World Commission on Environment and Development (WCED). Our Common Future: report of the Brundtland Commission. — Oxford: Oxford University Press, 1987. — URL: <https://www.are.admin.ch/are/en/home/media/publications/sustainable-development/brundtland-report.html>
- ²⁹ General Assembly. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей ООН 25 сентября 2015 года, A/RES/70/1. — URL: <https://undocs.org/A/RES/70/1>

³⁰ Григорьев Л. М., Майхрович М.Я. Теории роста и реалии последних десятилетий (Вопросы социокультурных кодов — к расширению исследовательской программы) // Вопросы экономики. 2023. №2. С. 18–42.

³¹ Артоболевский И. И., Сергеев В. И., Соболев И.М., Статников Р.Б. Об использовании ЭВМ при постановке задач оптимального проектирования машин // ДАН СССР, 1977. Т 233. №4, с. 567–570.

³² Подчуфаров Ю.Б., Понятский В.М. Комплексный подход при проектировании сложных технических систем. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. №4. С. 233–237.

³³ Галкина А. Н. Влияние атомной энергетики на достижение Целей устойчивого развития в условиях современных макроэкономических трендов: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.14 / СПбПУ. — 2023. — URL: https://www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/the-degree-of-candidate-of-sciences/galkina_anastasiya_nikolaevna/

³⁴ Sustainable Development Goals (SDG) Index Methodology // Sustainable Development Report. 2023. URL: <https://dashboards.sdgindex.org/chapters/methodology>

³⁵ Human Development Report 2010: The Real Wealth of Nations: Pathways to Human Development. 20th Anniversary Edition / United Nations Development Programme. — New York: Palgrave Macmillan, 2010. — xviii, 238 p. — ISBN 978-0-230-28445-6.