

## ПЕРСПЕКТИВЫ РЕАЛИЗАЦИИ СЦЕНАРИЕВ МИРОВОГО ЭНЕРГОПЕРЕХОДА<sup>1</sup>

**КОЛПАКОВ Андрей Юрьевич**, к.э.н., ankolp@gmail.com, Институт народнохозяйственного прогнозирования, Российская академия наук, Москва, Россия

ORCID: 0000-0003-4812-4582, Scopus Author ID: 55039903300

**ЗИНЧЕНКО Юлия Владимировна**, к.э.н., yuvzinch@mail.ru, Институт народнохозяйственного прогнозирования, Российская академия наук, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-7204-6858, Scopus Author ID: 57209096245

**ГАЛИНГЕР Александр Александрович**, к.э.н., gall2007nvdv@gmail.com, Институт народнохозяйственного прогнозирования, Российская академия наук, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-9561-9065, Scopus Author ID: 57216334965

*Авторы проанализировали несколько десятков публичных сценариев глобального энергоперехода и на их основе разработали четыре своих сценария, отличающихся амбициозностью снижения мировых энергетических эмиссий CO<sub>2</sub>. На основе собственной методики авторы оценили отношение затрат на энергию к ВВП для каждого разработанного сценария с целью понимания их реалистичности. Сценарии, обеспечивающие условия для удержания роста средней глобальной температуры в пределах 1,5 °C можно считать неосуществимыми ввиду экономических ограничений. Сценарий выполнения странами национальных вкладов в Парижское соглашение позволяет снизить мировые эмиссии CO<sub>2</sub> более чем на 20% к 2050 г. и может считаться возможным, но для его реализации мировая экономика должна функционировать в режиме предельно возможных затрат на энергию в течение нескольких десятилетий.*

*Ключевые слова:* углекислый газ, эмиссии, энергопереход, энергия, экономическое развитие, электроэнергия, Парижское соглашение, сценарии, устойчивое развитие.

DOI: 10.47711/0868-6351-201-138-150

Последнее десятилетие отметилось принципиальным усилением внимания, уделяемого проблемам изменения климата, на всех уровнях – международном и национальных, политическом и корпоративном, профессиональном и бытовом. Смягчение климатических изменений посредством борьбы с антропогенными эмиссиями парниковых газов приобретает императивный характер при формировании систем целеполагания и стратегий развития экономики и общества.

Взросший спрос на аналитическое и экспертное сопровождение разработки политик смягчения климатических изменений был должным образом воспринят, и он удовлетворяется целым рядом организаций и экспертных групп, которые перенастроили свои методические и модельные мощности на анализ возможностей низкоэмиссионной трансформации всех сфер жизни.

Здесь следует отметить, что основную долю указанных информационных продуктов генерируют организации, изначально связанные с развитием энергетических рынков. И это не удивительно – на топливно-энергетический комплекс (ТЭК) приходится примерно три четверти<sup>2</sup> всех эмиссий парниковых газов, и ключевые меры декарбонизации также касаются в первую очередь отраслей ТЭК [1; 2].

<sup>1</sup> Статья подготовлена при поддержке гранта в форме субсидий из федерального бюджета на выполнение научных исследований и работ в рамках реализации важнейшего инновационного проекта «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (соглашение о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации от 01.03.2023 № 139-15-2023-003 между Минэкономразвития России и ИИП РАН).

<sup>2</sup> URL: <https://www.wri.org/data/world-greenhouse-gas-emissions-2019>

В настоящее время разработано большое число разнообразных сценариев низкоэмиссионного развития, которые предполагают трансформацию энергетических рынков на фоне глобальных усилий по смягчению климатических рисков, а именно сокращение использования традиционных видов топлива при активном развитии безуглеродной энергетики. В этой связи сценарии низкоэмиссионного развития также называют сценариями глобального энергоперехода.

Коллективы, занимающиеся построением прогнозов развития мировой энергетики, достаточно давно практиковали оценку сопутствующего объема эмиссий и даже создавали специализированные сценарии, преследующие цели по их ограничению. При этом с каждым годом специализированные низкоэмиссионные сценарии становились все более и более амбициозными: на рис. 1 представлен анализ сценарных прогнозов, выпущенных в разные годы одной из наиболее авторитетных организаций в сфере прогнозирования ТЭК – International Energy Agency (IEA). В релизе 2014-2016 гг. самый амбициозный низкоэмиссионный сценарий назывался «Scenario 450», и в нем мировые эмиссии CO<sub>2</sub> снижались до уровня порядка 19 млрд т к 2040 г. Далее вплоть до релиза 2020 г. наиболее амбициозный сценарий назывался «Sustainable Development Scenario», в рамках которого эмиссии снижались уже до 15 млрд т к 2040 г. Релизы 2021-2022 гг. перешли на новую базу по эмиссиям, включающую все эмиссии от ТЭК и промышленных процессов, а также ввели новый сценарий «Net Zero Emissions by 2050», согласно которому эмиссии снижаются до величины порядка 6 млрд т к 2040 г. и обнуляются к 2050 г.

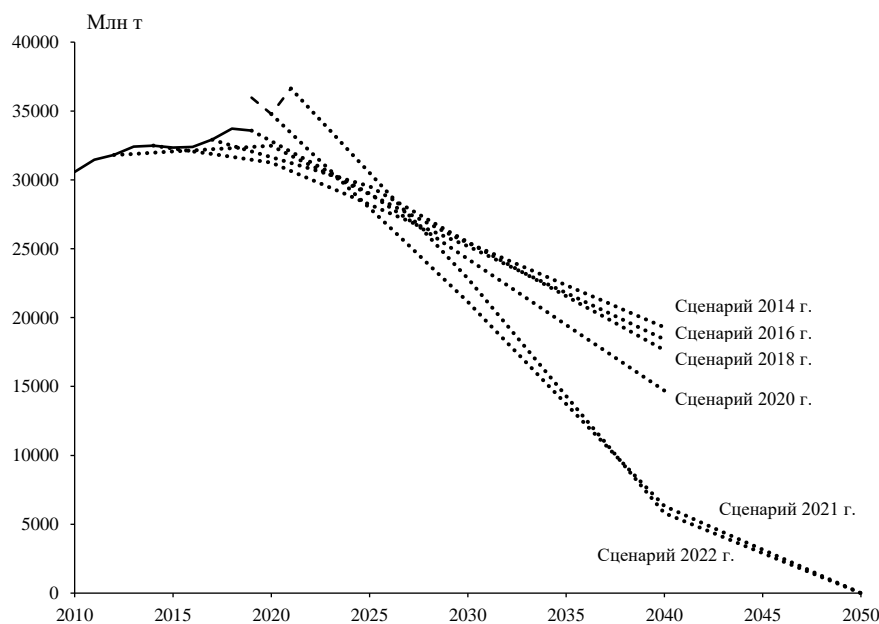


Рис. 1. Амбициозные сценарии IEA по мировым эмиссиям CO<sub>2</sub>:

(—) сплошная линия – фактические значения эмиссий, связанных со сжиганием топлива;  
 (---) пунктирная линия – фактические значения эмиссий от энергетического сектора и промышленных процессов; (•••) пунктирные линии – разные версии прогноза эмиссий, стартовая точка которых предшествует на один-два года дате их релиза:

Источник: IEA.

Парадокс заключается в том, что на протяжении упомянутых лет разработки все более амбициозных сценариев фактические эмиссии в мире увеличивались и достигали наивысших исторических значений сначала в 2021, а затем и в 2022 гг. [3].

Отсюда возникают закономерные вопросы: насколько состоятельны амбициозные сценарии снижения эмиссий, каким образом они соотносятся с действительностью, какие существуют ограничения для их реализации?

**Характеристика публичных сценариев развития мировой экономики и энергетики с учетом эмиссий парниковых газов.** В рамках настоящего исследования был проведен анализ нескольких десятков публичных сценариев развития мировой экономики и энергетики на фоне глобального энергоперехода на период до 2050 г., которые разработаны следующими ведущими экспертными группами и организациями: International Energy Agency (IEA); Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC); U.S. Energy Information Administration (EIA); DNV GL; World Energy Council (WEC); BP; Equinor; ExxonMobil; Shell; Total Energies; BNEF; Лукойл; Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО (совместно с ИНЭИ РАН) [4-16].

Сценарии были сгруппированы экспертным методом на основе кластеризации по объему выбросов CO<sub>2</sub>, связанных со сжиганием топлива (далее – энергетические выбросы CO<sub>2</sub>), в 2050 г. в следующие классы: неамбициозные сценарии, сценарии средней амбициозности, амбициозные сценарии и сверхамбициозные сценарии (табл. 1; 2).

Таблица 1

Классы публичных сценариев глобального энергоперехода на период до 2050 г.

Класс сценариев	Энергетические выбросы CO <sub>2</sub> в 2050 г.*	Изменение температуры к 2050 г. относительно доиндустриального уровня	Дополнительные критерии кластеризации
Неамбициозные	Выше 28 млрд т	Более 2 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>• медленные темпы научно-технического прогресса</li> <li>• недостаточные объемы финансирования и господдержки энергоперехода</li> <li>• углеводороды продолжают доминировать в потреблении энергии</li> <li>• недостижение цели Парижского соглашения по сдерживанию роста средней глобальной температуры в пределах 2 °С</li> </ul>
Среднеамбициозные	10-28 млрд т	В пределах 1,8-1,9 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>• выполнение странами заявленных национальных вкладов в рамках Парижского соглашения</li> <li>• технологические сдвиги существенные, но недостаточные для достижения углеродной нейтральности к 2050 г.</li> <li>• достижение цели Парижского соглашения по сдерживанию роста средней глобальной температуры в пределах 2 °С, но недостижение амбициозной цели по ее удержанию в пределах 1,5 °С</li> </ul>
Амбициозные	5-10 млрд т	В пределах 1,6-1,7 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>• технологические сдвиги кардинальные и закладывающие траектории достижения глобальной углеродной нейтральности к 2060 г.</li> <li>• достижение цели Парижского соглашения по сдерживанию роста средней глобальной температуры в пределах 2 °С, но вероятное недостижение амбициозной цели по ее удержанию в пределах 1,5 °С</li> </ul>
Высокоамбициозные	Ниже 5 млрд т	В пределах 1,5 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>• практически полный переход на безуглеродные технологии, дополненный развитием технологий улавливания CO<sub>2</sub></li> <li>• беспрецедентное международное сотрудничество в области энергоперехода; достижение амбициозной цели Парижского соглашения по сдерживанию роста средней глобальной температуры в пределах 1,5 °С</li> </ul>

\* Энергетические выбросы CO<sub>2</sub> в 2019 г. составили 33 млрд т, в 2020 г. – 32 млрд т.

Источник: анализ авторов.

При кластеризации также дополнительно учитывались такие критерии, как изменение температуры относительно доиндустриального уровня к 2050 г., уровень развития технологий, спрос на углеводороды и степень государственной поддержки энергоперехода.

Таблица 2

Основные характеристики публичных сценариев энергоперехода

Сценарии	Мировые энергетические выбросы CO <sub>2</sub> в 2050 г., млрд т	Прирост мирового потребления энергии за 2020-2050 гг., %				
		Первичная энергия	Нефть	Природный газ	Уголь	Безуглеродная энергия
<i>Неамбициозные сценарии</i>						
EIA High Economic Growth	52	78	78	58	38	146
EIA High Oil Price	50	74	62	60	37	151
EIA Reference	43	47	49	31	14	104
EIA Low Oil Price	37	26	35	8	-4	68
ИНЭИ+Сколково Консервативный*	37	20	12	38	-4	44
WEC Rock	36	27	28	37	-12	66
EIA Low Economic Growth	36	24	25	11	-6	72
Shell Waves	35	59	19	25	-3	258
ОПЕС*	35	25	17	30	-12	81
Shell Islands	34	24	9	18	-4	96
ИНЭИ+Сколково Инновационный*	33	16	0	43	-17	54
Equinor Rivalry	32	20	20	21	-23	75
IEA Stated policy	31	26	13	26	-24	114
ExxonMobil	29	22	19	36	-32	77
Лукойл Эволюция	28	29	5	37	-36	150
WEC Jazz	28	17	-7	72	-54	84
<i>Среднеамбициозные сценарии</i>						
ИНЭИ+Сколково Энергопереход*	28	11	-11	34	-25	66
BP New Momentum	27	28	-12	31	-32	203
Equinor Reform	24	10	-9	18	-43	101
TotalEnergies Momentum	24	22	-31	35	-23	142
IEA Announced Pledges	19	14	-16	-4	-50	167
Shell Sky	18	45	-9	-15	-34	323
DNV GL	18	2	-47	-8	-60	208
WEC Symphony	17	9	-32	46	-71	141
Лукойл Равновесие	17	21	-22	21	-79	229
<i>Амбициозные сценарии</i>						
Equinor Rebalance	9	-12	-51	-22	-82	153
BP Accelerated	9	16	-50	-32	-84	381
IEA Sustainable Development	8	-2	-49	-39	-78	212
TotalEnergies Rupture	7	13	-56	11	-77	232
<i>Высокоамбициозные сценарии</i>						
Лукойл Трансформация	5	13	-52	-24	-92	309
BP Net Zero	2	9	-75	-56	-89	431
IEA Net Zero Emissions	1	-8	-76	-56	-89	258
Bloomberg Green	0	-5	-84	-85	-98	370
Bloomberg Gray	0	-4	-66	4	-31	130
Bloomberg Red	0	35	-77	-70	-100	561

\* Для сценариев ИНЭИ+Сколково и ОПЕС динамика дана за 2020-2040 гг.

Источник: анализ авторов.

Неамбициозные сценарии характеризуются повышением мирового энергопотребления на величину порядка 15-80% за 2020-2050 гг., при этом почти во всех из них растет потребление нефти и газа, тогда как потребление угля снижается. Несмотря на относительно высокие показатели эмиссий CO<sub>2</sub>, по темпам прироста по-

ребления лидируют безуглеродные источники (потребление атомной, гидро-, возобновляемой энергии совокупно растет на 45-260%), однако таких темпов оказывается недостаточно для достижения целей климатической политики (а именно удержания прироста средней глобальной температуры в пределах 2 °С).

В сценариях средней амбициозности рост мирового энергопотребления оказывается существенно ниже вследствие более значительных достижений в сфере энергоэффективности. Изменение потребления нефти и угля – отрицательное во всех сценариях (причем угля – в большей степени, чем нефти), а изменение спроса на газ варьируется в диапазоне от порядка –15% до +45%. Прирост потребления безуглеродной энергии еще более выражен – на 65-325%.

Половина из десяти амбициозных и сверхамбициозных сценариев допускают такой формат экономического роста, который характеризуется снижением спроса на энергию. Перспективы углеводородов в этом классе сценариев крайне неблагоприятны (вплоть до полного исчезновения спроса на уголь и обвала на 80% потребления нефти), и лишь два сценария предполагают рост потребления природного газа (в пределах 11%). Акцент полностью смещается на развитие безуглеродной энергетики.

Ключевой вопрос, который остается открытым: какие из этих сценариев возможны, а какие не могут быть реализованы из-за объективных ограничений, связанных с их чрезмерной дороговизной для экономики и общества?

Большинство исследовательских работ [17-27] сосредоточены на следующих экономических эффектах реализации низкоэмиссионных сценариев: а) изменение выпусков и торговых потоков различных энергоресурсов, а также связанных с этим финансовых результатов (доходов, налогов); б) перераспределение инвестиций из углеродоемких в низкоэмиссионные технологии, а также их общее увеличение из-за более высокой капиталоемкости альтернативных решений; в) изменение цен на энергоресурсы и связанные с этим инфляционные процессы; г) изменение объема (из-за более высокой трудоемкости низкоэмиссионных технологий) и отраслевой структуры занятости.

В то же время работы, рассматривающие изменение параметров потребления в экономике вследствие ускоренного роста цен<sup>3</sup>, редко встречаются в области исследований энергоперехода. Главная сложность заключается в том, что подобные симуляции требуют глубокого понимания национальных особенностей и достаточно развитого модельного инструментария, позволяющего анализировать реакцию объема и видовой структуры потребления домашних хозяйств на изменения цен – как например, метод PADS [28-30].

Понятно, что при анализе глобальных сценариев возникают методические ограничения, связанные с чересчур обширным объектом изучения. Тем не менее, внедрение элементов воздействия капиталоемкости энергоперехода на общую экономическую стабильность необходимо и является обязательным условием в дискуссии вокруг построения сценариев низкоэмиссионной трансформации.

**Методический подход к оценке экономической устойчивости сценариев глобального энергоперехода.** В рамках исследования авторы поставили перед собой задачу по изучению возможностей реализации рассмотренных выше групп сценариев с точки зрения их влияния на устойчивость мирового экономического развития на прогнозном периоде. Согласно ряду исследований [31-35], отношение затрат на энергию к ВВП имеет предельные значения, в рамках которых находится зона устойчивого развития экономики. На основе ретроспективных эмпирических наблюдений было установлено, что мировая экономическая динамика переставала быть устойчивой в те периоды, когда затраты на энергию достигали и превышали

<sup>3</sup> Например: Порфирьев Б.Н., Широков А.А., Колпаков А.Ю., Единак Е.А. Возможности и риски политики климатического регулирования в России // Вопросы экономики. 2022. № 1. С. 72-89. URL: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2022-1-72-89>

11% от объема мирового ВВП. Указанный уровень принят в качестве критического и на перспективном периоде при анализе разных групп сценариев.

Методический подход<sup>4</sup> по оценке отношения мировых затрат на энергию к ВВП схематично представлен на рис. 2.

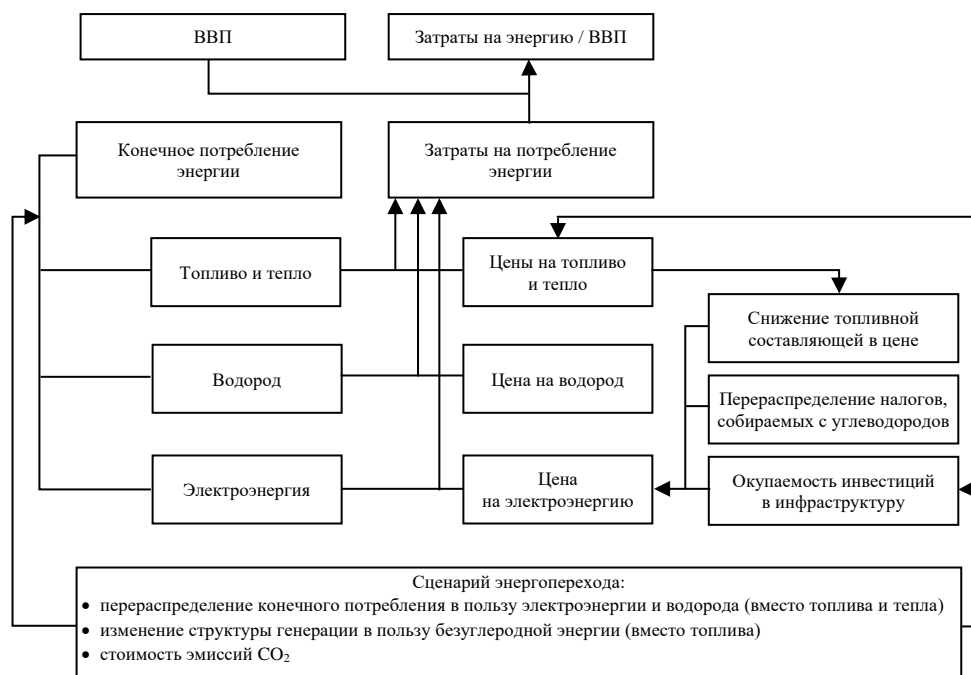


Рис. 2. Схема оценки отношения мировых затрат на энергию к ВВП в сценариях глобального энергоперехода

Поскольку энергопереход тесно связан с электрификацией процессов потребления и расширением безуглеродных видов генерации, целесообразно сосредоточиться на рассмотрении конечного энергопотребления<sup>5</sup>, а также конечных (потребительских) цен топливно-энергетических ресурсов. Сценарии энергоперехода, в зависимости от их амбициозности, характеризуются различными пропорциями перераспределения потребления топлив в пользу электроэнергии и водорода, замещения угля и природного газа безуглеродными видами энергии в структуре генерации; стоимостью эмиссии CO<sub>2</sub>. Необходимость развития инфраструктуры низкоэмиссионной экономики отражается, в первую очередь, на цене электроэнергии, поскольку данный сектор является центральным звеном процессов декарбонизации. Соответственно, стоимость строительства генерирующих объектов безуглеродной энергетики, а также электрических сетей и резервирующих или аккумулирующих мощностей (необходимых для поддержания надежности

<sup>4</sup> Подробное описание представлено в: Колтаков А.Ю., Янговский А.А., Галингер А.А. Цена достижения нулевых эмиссий CO<sub>2</sub> к середине века: метод и оценка для крупнейших экономик мира // Журнал Новой экономической ассоциации. 2022. № 3 (55). С. 139-154. DOI: 10.31737/2221-2264-2022-55-3-7.

<sup>5</sup> Электроэнергия относится к преобразованным видам энергии, поэтому в первичное энергопотребление не попадают объемы ее производства. Вместо этого в первичной энергии отражены потребленные для генерации электроэнергии объемы природного газа, угля, атомной и гидро-, а также возобновляемой энергии. И, если с оценкой затрат на газ и уголь вопросов не возникает, то совершенно не ясно, какие цены применять в отношении использованной энергии воды, солнца или ветра. А ведь в сценариях энергоперехода именно эти виды энергии увеличивают свою роль в структуре выработки электроэнергии. Аналогичные сложности возникают с водородом.

энергосистемы, опирающейся на возобновляемые источники энергии [36]) трансформируется в надбавку к цене электроэнергии. При этом указанная надбавка рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить окупаемость инвестиций за 15-20 лет (в зависимости от страны) с учетом процентных надбавок к платежам по кредитам. Поскольку потребление угля и газа в электроэнергетике сокращается, роль топливной составляющей производственных затрат в цене электроэнергии постепенно уменьшается. Еще один аспект, связанный с уходом от ископаемых топлив, – сокращение налоговых платежей в бюджеты стран, в том числе, рентных платежей и акцизов на моторные топлива. В рамках выполняемых расчетов указанные выпадающие поступления переносятся на цену электроэнергии с тем, чтобы компенсировать возникающие бюджетные дисбалансы.

Все расчеты проводятся для крупнейших 12 стран и объединений (США, Канада, Мексика, ЕС, Россия, Китай, Индия, Япония, Южная Корея, Австралия, Индонезия, Бразилия – на них приходится порядка 80% мирового энергопотребления) и мира в целом.

#### *Оценка экономической устойчивости сценариев глобального энергоперехода.*

Для выполнения количественных оценок было сконструировано четыре сценария: Неамбициозный (НА); Среднеамбициозный (СА); Амбициозный (А); Высокоамбициозный (ВА). Параметры каждого из них подбирались таким образом, чтобы они соответствовали количественно типовым «вилкам» значений аналогичных групп публичных сценариев, качественно – их логике. Характеристики разработанных сценариев представлены в табл. 3.

Во всех сценариях рассмотрена одинаковая динамика мирового ВВП, среднегодовой темп прироста которого составляет 2,3% до 2050 г. В действительности это очень смелая гипотеза, так как столь разные масштабы перехода на безуглеродную энергию, безусловно, приведут к разным характеристикам мировой экономики. Однако, этот аспект не является предметом и принципиальным условием описываемого здесь исследования, поэтому авторы считают достаточным отметить данное обстоятельство.

Если посмотреть на сценарий НА, то его можно назвать неамбициозным лишь условно и только потому, что глобальные энергетические эмиссии CO<sub>2</sub>, достигнув пика в 2030 г., все же в 2050 г. оказываются чуть выше (на 3%) уровня 2019 г. При этом конечное потребление энергии вырастает к середине века на 16%; объем потребления электроэнергии повышается практически в два раза, а ее доля в структуре конечного потребления увеличивается с текущих 26% до 40%; практически весь прирост генерации электроэнергии осуществляется за счет безуглеродных источников, – их доля в структуре генерации увеличивается за 2019-2050 гг. с 39% до 74%.

В сценарии СА удается снизить глобальные энергетические эмиссии CO<sub>2</sub> на 21% к середине века – до 27 Гт. Это происходит вследствие более энергоэффективного развития (конечное потребление растет только на 9%); более интенсивной электрификации (доля электроэнергии в конечном потреблении составляет уже 47%, а вместе с водородом они покрывают половину всего спроса на энергию); сокращения в два раза электрогенерации на основе углеводородов и доведения доли безуглеродных источников до 87%.

В сценариях А и ВА эмиссии CO<sub>2</sub> составляют 9,5 и 4,5 Гт в 2050 г., снизившись на 72% и 87% соответственно. Объем конечного энергопотребления оказывается ниже современных значений (при двукратном росте мирового ВВП), а электроэнергия и водород покрывают вместе 81% и 95% конечного энергопотребления (причем

в сценарии ВА потенциал электрификации практически исчерпан, поэтому происходит принципиальное увеличение роли водородной энергетики).

Таблица 3

## Ключевые характеристики разработанных сценариев глобального энергоперехода

Показатель	2019 г.	2030 г.	2040 г.	2050 г.
Мировой ВВП, 2019 = 100	100	132	164	204
<i>Неамбициозный сценарий (НА)</i>				
Энергетические выбросы CO <sub>2</sub> , млрд т	33,6	37,4	36,2	34,7
Конечное энергопотребление (без сырьевых нужд), ЭДж	372,3	410,3	418,5	433,2
Углеводороды	277,2	292,1	275,8	257,6
Электроэнергия и тепло	95,1	117,9	141,9	174,3
Водород	0,0	0,2	0,8	1,3
Производство электроэнергии, ПВт.ч	26,8	34,8	43,1	54,2
Углеводороды	16,5	17,3	15,9	14,2
Безуглеродные источники	10,4	17,5	27,2	40,0
Мировая цена нефти, долл. (2021)/барр.	66	81	86	92
Средневзвешенная цена электроэнергии, цент (2021)/кВт.ч	14,4	17,9	21,6	22,7
<i>Среднеамбициозный сценарий (СА)</i>				
Энергетические выбросы CO <sub>2</sub> , млрд т	33,6	34,5	31,4	26,8
Конечное энергопотребление (без сырьевых нужд), ЭДж	372,3	396,0	398,6	404,7
Углеводороды	277,2	269,3	240,3	200,6
Электроэнергия и тепло	95,1	124,4	150,3	190,1
Водород	0,0	2,3	8,1	14,0
Производство электроэнергии, ПВт.ч	26,8	37,7	48,0	63,0
Углеводороды	16,5	15,3	12,0	7,9
Безуглеродные источники	10,4	22,4	36,0	55,1
Мировая цена нефти, долл. (2021)/барр.	66	70	69	67
Средневзвешенная цена электроэнергии, цент (2021)/кВт.ч	14,4	18,9	22,5	23,6
<i>Амбициозный сценарий (А)</i>				
Энергетические выбросы CO <sub>2</sub> , млрд т	33,6	28,8	18,8	9,5
Конечное энергопотребление (без сырьевых нужд), ЭДж	372,3	368,0	345,4	344,0
Углеводороды	277,2	224,8	142,1	63,8
Электроэнергия и тепло	95,1	140,7	192,9	259,5
Водород	0,0	2,5	10,4	20,8
Производство электроэнергии, ПВт.ч	26,8	43,8	64,1	89,3
Углеводороды	16,5	12,4	6,7	2,3
Безуглеродные источники	10,4	31,4	57,4	87,1
Мировая цена нефти, долл. (2021)/барр.	66	59	55	52
Средневзвешенная цена электроэнергии, цент (2021)/кВт.ч	14,4	20,7	24,0	24,4
<i>Высокоамбициозный сценарий (ВА)</i>				
Энергетические выбросы CO <sub>2</sub> , млрд т	33,6	28,2	15,2	4,5
Конечное энергопотребление (без сырьевых нужд), ЭДж	372,3	369,0	338,0	333,9
Углеводороды	277,2	217,7	104,4	18,8
Электроэнергия и тепло	95,1	136,0	199,2	266,4
Водород	0,0	15,3	34,4	48,7
Производство электроэнергии, ПВт.ч	26,8	44,9	71,5	98,0
Углеводороды	16,5	11,6	2,5	0,5
Безуглеродные источники	10,4	33,3	69,0	97,5
Мировая цена нефти, долл. (2021)/барр.	66	38	31	25
Средневзвешенная цена электроэнергии, цент (2021)/кВт.ч	14,4	21,1	24,8	25,0

Источник: оценки авторов.

Уровень мировых цен на нефть тем ниже, чем более амбициозен сценарий снижения эмиссий CO<sub>2</sub>, так как углеводороды становятся все менее востребованным товаром, и снижается потребность разработки новых залежей и окупаемости капитальных вложений в секторе добычи.

Напротив, более быстрые темпы электрификации и строительства мощностей безуглеродной генерации требуют высокого уровня цен на электроэнергию. В результате в сценариях А и ВА электроэнергия оказывается дороже относительно сценария НА на 16-18% уже в 2030 г., после чего разница сокращается до 8-10% к 2050 г. В сценарии СА разрыв не столь велик, однако электроэнергия все равно оказывается на 4-6% дороже на всем прогнозном периоде.



В табл. 4 представлена оценка отношения мировых затрат на энергию к мировому ВВП для всех разработанных сценариев.

Для сценариев А и ВА данный показатель в районе 2030 г. превышает 11% (уровень, за которым устойчивый рост мировой экономики считается невозможным) и остается на предельно высоких значениях в дальнейшем. Это означает, что указанные сценарии с высокой степенью уверенности можно считать внутренне несбалансированными и поэтому невозможными. Сценарий НА характеризуется некоторым удорожанием энергоснабжения, однако это не подрывает платежеспособность мировой экономики и потенциал для ее развития. Что касается сценария СА, то его можно считать теоретически возможным, при этом следует понимать, что для его реализации мировая экономика должна будет функционировать в режиме предельно возможных затрат на энергию перманентно в течение нескольких десятилетий, чего в обозримой ретроспективе никогда не происходило.

Таблица 4

Отношение мировых затрат на энергию к мировому ВВП в разработанных сценариях глобального энергоперехода, %

Показатель	2019 г.	2030 г.	2040 г.	2050 г.
Неамбициозный сценарий (НА)	8,9	9,5	9,8	9,4
Углеводороды	4,4	4,2	3,5	2,8
Электроэнергия и тепло	4,5	5,2	6,2	6,6
Водород	0,0	0,0	0,0	0,0
Среднеамбициозный сценарий (СА)	8,9	10,0	10,7	10,6
Углеводороды	4,4	4,0	3,3	2,5
Электроэнергия и тепло	4,5	6,0	7,2	7,9
Водород	0,0	0,1	0,2	0,2
Амбициозный сценарий (А)	8,9	10,5	12,2	12,6
Углеводороды	4,4	2,9	1,8	0,7
Электроэнергия и тепло	4,5	7,5	10,2	11,6
Водород	0,0	0,1	0,2	0,4
Высокоамбициозный сценарий (ВА)	8,9	11,1	13,7	14,1
Углеводороды	4,4	2,9	1,3	0,3
Электроэнергия и тепло	4,5	7,9	11,7	13,0
Водород	0,0	0,4	0,7	0,8

Источник: оценки авторов.

Кроме того, нужно иметь в виду, что ограничение в 11% является среднемировым, тогда как на уровне отдельных стран и регионов затраты на энергию могут превышать данное предельное значение (табл. 5).

Это связано, в первую очередь, со спецификой мирового разделения труда, в результате которого развитые страны прошли через стадию «облегчения» структуры своей экономики, и наиболее энергоемкие производства в настоящее время расположены в развивающихся странах. Высокая энергоемкость развивающихся экономик отчасти компенсируется относительно низкими ценами на энергию (по сравнению с развитыми странами). Однако эти обстоятельства делают экономику развивающихся стран очень чувствительной к росту цен, а любые значимые трансформации энергетического сектора связаны с высокими капиталовложениями и ведут к удорожанию топливно-энергетических ресурсов.

Таким образом, сценарии А и ВА не могут быть реализованы в первую очередь, в крупных развивающихся странах – таких как Китай, Индия, Россия и др. Но поскольку эти страны являются важной и неотъемлемой составляющей мировой экономики, тезис о невозможности реализации сценариев А и ВА естественным образом распространяется на мир в целом. В то же время для США и ЕС амбициозные климатические сценарии сами по себе создают намного меньшие риски.

Таблица 5

Отношение затрат на энергию к ВВП в разработанных сценариях глобального энергоперехода для разных стран и регионов, %

Страна/регион	2019 г.	2030 г.	2040 г.	2050 г.
Австралия				
Сценарий НА	8	7	7	6
Сценарий СА	8	9	8	7
Сценарий А	8	9	8	8
Сценарий ВА	8	11	13	13
Бразилия				
Сценарий НА	10	12	12	12
Сценарий СА	10	12	12	12
Сценарий А	10	12	12	12
Сценарий ВА	10	13	15	14
ЕС				
Сценарий НА	10	10	10	9
Сценарий СА	10	10	10	9
Сценарий А	10	11	11	11
Сценарий ВА	10	11	12	12
Индия				
Сценарий НА	14	15	15	15
Сценарий СА	14	15	16	15
Сценарий А	14	15	18	18
Сценарий ВА	14	16	20	21
Индонезия				
Сценарий НА	10	10	10	9
Сценарий СА	10	11	11	11
Сценарий А	10	11	12	11
Сценарий ВА	10	12	13	13
Канада				
Сценарий НА	12	12	11	11
Сценарий СА	12	13	12	11
Сценарий А	12	13	12	12
Сценарий ВА	12	14	14	14
Китай				
Сценарий НА	11	11	12	11
Сценарий СА	11	11	13	13
Сценарий А	11	13	16	16
Сценарий ВА	11	14	18	18
Корея				
Сценарий НА	11	11	11	11
Сценарий СА	11	12	12	12
Сценарий А	11	12	12	12
Сценарий ВА	11	12	14	14
Мексика				
Сценарий НА	11	12	11	11
Сценарий СА	11	12	12	12
Сценарий А	11	12	12	12
Сценарий ВА	11	12	14	13
Россия				
Сценарий НА	13	14	15	15
Сценарий СА	13	16	19	20
Сценарий А	13	17	25	28
Сценарий ВА	13	20	30	33
США				
Сценарий НА	6	6	6	6
Сценарий СА	6	7	7	6
Сценарий А	6	7	8	8
Сценарий ВА	6	7	8	8
Япония				
Сценарий НА	9	9	9	8
Сценарий СА	9	10	10	11
Сценарий А	9	10	10	11
Сценарий ВА	9	10	12	13

Источник: оценки авторов.

**Заключение.** Прогнозы развития мировой энергетики сходятся во мнении, что ведущим процессом на ближайшие десятилетия станет замещение углеводородов безуглеродными источниками в структуре мирового энергобаланса на фоне достижения целей устойчивого развития, в частности, усилий по смягчению климатических изменений через снижение антропогенных эмиссий парниковых газов, львиная доля которых приходится на топливно-энергетический комплекс.

Однако ключевой вопрос заключается не только в том, какие масштабы этого процесса необходимы для снижения климатических рисков, но и в том, могут ли они в принципе быть обеспечены при существующих объективных ограничениях.

Наш анализ показывает, что в сценариях резкого снижения мировых энергетических выбросов CO<sub>2</sub>, которые обеспечивают условия выполнения амбициозной цели Парижского соглашения по сдерживанию прироста средней глобальной температуры в пределах 1,5 °C к концу века (относительно доиндустриального уровня), нарушаются предпосылки устойчивого роста мировой экономики. Причем главные риски ложатся на развивающиеся страны, в которых сосредоточена подавляющая часть населения планеты и производственных мощностей, создающих первичный доход мировой экономики. Это означает, что амбициозные низкоэмиссионные сценарии являются либо невозможными, либо связаны с тотальным ростом бедности и экономической деградацией в развивающемся мире, которые фактически останавливают поступательное социально-экономическое развитие на глобальном уровне.

При планировании будущего следует принимать во внимание то, что с учетом экономических ограничений реалистичными являются сценарии снижения энергетических эмиссий CO<sub>2</sub> к 2050 г. примерно на 30% или менее. Связанные с этим последствия для глобальной климатической системы и «остаточные» риски для населения и экономики должны демпфироваться иными способами, отличными от снижения эмиссий. Главным образом, речь идет об опоре на поглощение углерода экосистемами и на механизмы адаптации к указанным последствиям.

### *Литература / References*

1. IPCC. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge. UK and New York. NY. USA. 2022. DOI: 10.1017/9781009157926
2. IEA. *Energy Technology Perspectives 2023*. IEA, Paris. 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
3. IEA. *CO2 Emissions in 2022*. IEA, Paris. 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
4. IEA. *World Energy Outlook 2021*. IEA, Paris. 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
5. OPEC. *World Oil Outlook 2045*. 2022. URL: [https://www.opec.org/opec\\_web/en/publications/340.htm](https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm)
6. EIA. *International Energy Outlook 2021*. 2022. URL: <https://www.eia.gov/outlooks/archive/aeo21/>
7. DNV GL. *Energy Transition Outlook 2021*. 2022. URL: <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/download.html>
8. WEC. *World Energy Scenarios 2019*. 2019. URL: [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Scenarios\\_FINAL\\_for\\_website.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Scenarios_FINAL_for_website.pdf)
9. BP. *Energy Outlook 2022*. 2022. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf>
10. Equinor. *Energy Perspectives 2021: Long-term macro and market outlook*. 2021. URL: <https://www.equinor.com/content/dam/statoil/documents/energy-perspectives/energy-perspectives-report-2021.pdf>
11. Exxon Mobil. *Outlook for energy: a perspective to 2040*. 2022. URL: <https://corporate.exxonmobil.com/Energy-and-innovation/outlook-for-energy>
12. Shell. *The energy transformation scenarios*. 2021. URL: [https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/the-energy-transformation-scenarios/\\_jcr\\_content/root/main/section\\_524990089/simple/promo\\_copy/links/item0.stream/1652119830834/fba2959d9759c5ae806a03acfb187f1c33409a91/energy-transformation-scenarios.pdf](https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/the-energy-transformation-scenarios/_jcr_content/root/main/section_524990089/simple/promo_copy/links/item0.stream/1652119830834/fba2959d9759c5ae806a03acfb187f1c33409a91/energy-transformation-scenarios.pdf)
13. TotalEnergies. *Energy Outlook 2022*. 2022. URL: [https://totalenergies.com/system/files/documents/2022-09/TotalEnergies\\_Energy\\_Outlook\\_2022.pdf](https://totalenergies.com/system/files/documents/2022-09/TotalEnergies_Energy_Outlook_2022.pdf)
14. BNEF. *New Energy Outlook 2021*. 2021. URL: <https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/NEO-Executive-Summary-2021.pdf>
15. Лукойл. *Перспективы развития мировой энергетики до 2050 года*. 2021. URL: <https://lukoil.ru/FileSystem/9/570591.pdf> [Lukoil. *Global Energy Perspectives to 2050*. 2021. (In Russ.)]

16. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. ИИЭИ РАН. Московская школа управления СКОЛКОВО. М., 2019. 210 с. ISBN 978-5-91438-028-8. [Global and Russian Energy Outlook 2019 / ed. A.A. Makarov, T.A. Mitrova, V.A. Kulagin; ERI RAS. Moscow School of Management SKOLKOVO. M., 2019. 210 s. (In Russ.)]
17. Макаров А.А., Кейко А.В., Малахов В.А. и др. Исследование путей и темпов развития низкоуглеродной энергетики в России / под ред. А.А. Макарова. М.: ИИЭИ РАН, 2022. 138 с. [Makarov A.A., Kejko A.V., Malahov V.A. i dr. Issledovanie putej i tempov razvitiya nizkouglerodnoj energetiki v Rossii / pod red. A.A. Makarova. M., INEI RAN, 2022. 138 s. (In Russ.)]
18. Center for energy efficiency – XXI. Russia's carbon neutrality: pathways to 2060. 2022. URL: [https://cenef-xxi.ru/uploads/Report\\_CENEF\\_XXI\\_0076074542.pdf](https://cenef-xxi.ru/uploads/Report_CENEF_XXI_0076074542.pdf)
19. IRENA. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050. 2019 edition. URL: <https://www.irena.org/DigitalArticles/2019/Apr/-/media/652AE07BBAAC407ABD1D45F6BBA8494B.ashx>
20. IRENA. Renewable energy benefits: Measuring the economics. 2016. URL: [https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena\\_measuring-the-economics\\_2016.pdf](https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_measuring-the-economics_2016.pdf)
21. Ernst & Young. Macro-economic impacts of the low carbon transition. 2014. URL: [https://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2014/06/EY\\_ECF\\_Macro-economic-impacts-of-the-low-carbon-transition\\_Report\\_2014-06-05.pdf](https://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2014/06/EY_ECF_Macro-economic-impacts-of-the-low-carbon-transition_Report_2014-06-05.pdf)
22. Ram M., Aghahosseini A., Breyer C. Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050 // *Technological Forecasting and Social Change*. 2020. Vol. 151. (119682). URL: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.06.008>
23. Almutairi K., Thoma G., Durand-Morat A. Ex-Ante Analysis of Economic, Social and Environmental Impacts of Large-Scale Renewable and Nuclear Energy Targets for Global Electricity Generation by 2030 // *Sustainability*. 2018. Vol. 10. No. 8. (2884). URL: <https://doi.org/10.3390/su10082884>
24. Grottera C., Rovere E.L.L., Wills W., Pereira A.O. Jr. The role of lifestyle changes in low-emissions development strategies: An economy-wide assessment for Brazil // *Climate Policy*. 2020. Vol. 20. No. 2. Pp. 217-233. DOI: 10.1080/14693062.2020.1717415.
25. Antosiewicz M., Nikas A., Szpor A., Witajewski-Baltvilks J., Doukas H. Pathways for the transition of the Polish power sector and associated risks // *Environmental Innovation and Societal Transitions*. 2020. Vol. 35. Pp. 271-291. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.01.008>
26. Koutsandreas D., Spiliotis E., Doukas H., Psarras J. What Is the Macroeconomic Impact of Higher Decarbonization Speeds? The Case of Greece // *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 8 (2235). Pp. 1-19. URL: <https://doi.org/10.3390/en14082235>
27. Laitner J., Lugovoy O., Potashnikov V. Cost and benefits of deep decarbonization in Russia // *Ekonomicheskaya Politika*. 2020. Vol. 15. No. 2. Pp. 86-105. URL: <https://doi.org/10.18288/1994-5124-2020-2-86-105>
28. Almon C. A perhaps adequate demand system // *INFORUM Working Papers*. University of Maryland. 1996. Vol. 96. No. 7. 26 p. URL: <http://inforumweb.inforumecon.com/papers/wp/wp/1996/wp96007.pdf>
29. Потапенко В.В., Широу А.А. Особенности прогнозирования потребления домашних хозяйств в условиях структурной неоднородности доходов и цен // *Проблемы прогнозирования*. 2021. № 1. С. 6-18. DOI: 10.47711/0868-6351-184-6-18. [Potapenko V.V., Shirov A.A. Forecast of Russian Personal Consumption Expenditures as Function of Income Distribution and Relative Prices // *Studies on Russian Economic Development*. 2021. Vol. 32. Iss. 1. Pp. 1-10. URL: <https://doi.org/10.1134/S1075700721010111> (In Russ.)]
30. Bardazzi R., Barnabani M. A long-run disaggregated cross-section and time-series demand system: an application to Italy // *Economic Systems Research*. 2001. № 13 (4). Pp. 365-389.
31. Ayres R., Ayres L., Warr B. Exergy, power and work in the US economy, 1900 – 1998 // *Energy*. 2003. Vol. 28. Pp. 219-273. DOI: 10.1016/S0360-5442(02)00089-0.
32. Warr B., Ayres R. Evidence of causality between the quantity and quality of energy consumption and economic growth // *Energy*. 2010. Vol. 35. Pp. 1688-1693. DOI: 10.1016/j.energy.2009.12.017.
33. Stern D. Energy and economic growth in the USA: A multivariate approach // *Energy Economics*. 1993. Vol. 15. Iss. 2. Pp. 137-150. URL: [https://doi.org/10.1016/0140-9883\(93\)90033-N](https://doi.org/10.1016/0140-9883(93)90033-N)
34. Башмаков И.А. Цены на нефть: пределы роста и глубины падения // *Вопросы экономики*. 2006. № 3. С. 28-41. URL: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2006-3-28-41> [Bashmakov I. Oil Prices: Limits to Growth and the Depth of Falling // *Voprosy Ekonomiki*. 2006. No. 3. Pp. 28-41. (In Russ.)]
35. Цибульский В.Ф. Энергетические ограничения экономического роста // *Энергетическая политика*. 2019. № 1. С. 28-33. [Tsubul'skiy V.F. Energetic limits to economic growth // *Energy Policy*. 2019. No. 1. Pp. 28-33. (In Russ.)]
36. Veselov F., Pankrushina T., Khorshev A. Comparative economic analysis of technological priorities for low-carbon transformation of electric power industry in Russia and the EU // *Energy Policy*. 2021. No. 156: 112409. DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112409.



Статья поступила в редакцию 31.05.2023. Статья принята к публикации 21.06.2023.

**Для цитирования:** А.Ю. Колпаков, Ю.В. Зинченко, А.А. Галингер. Перспективы реализации сценариев мирового энергоперехода // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6 (201). С. 138-150.

DOI: 10.47711/0868-6351-201-138-150

## Summary

### PROSPECTS FOR THE IMPLEMENTATION OF THE WORLD ENERGY TRANSITION SCENARIOS

**A.Yu. KOLPAKOV**, Cand. Sci. (Econ.), Institute of Economic Forecasting, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0003-4812-4582, Scopus Author ID: 55039903300

**Yu.V. ZINCHENKO**, Cand. Sci. (Econ.), Institute of Economic Forecasting, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-7204-6858, Scopus Author ID: 57209096245

**A.A. GALINGER**, Cand. Sci. (Econ.), Institute of Economic Forecasting, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-9561-9065, Scopus Author ID: 57216334965

**Abstract:** The authors analyzed several dozens of public scenarios of the global energy transition and, on their basis, developed four of their own scenarios, which are notable for the ambitiousness in reduction of global energy CO<sub>2</sub> emissions. Based on their own methodology, the authors estimated the ratio of energy costs to GDP for each developed scenario in order to understand their feasibility. The scenarios that provide conditions for keeping the growth of the average global temperature within 1.5°C can be considered unfeasible due to economic constraints. The scenario of nationally determined contributions made by countries to the Paris Agreement makes it possible to reduce global CO<sub>2</sub> emissions by more than 20% by 2050 and can be considered possible, but for its implementation the world economy must operate in the mode of maximum possible energy costs for several decades.

**Keywords:** carbon dioxide, emissions, energy transition, energy, economic development, electricity, Paris Agreement, scenarios.

Received 31.05.2023. Accepted 21.06.2023.

**For citation:** A.Yu. Kolpakov, Yu.V. Zinchenko and A.A. Galinger. Prospects for the Implementation of the World Energy Transition Scenarios // Studies on Russian Economic Development. 2023. Vol. 34. No. 6. Pp. 820-829.

DOI: 10.1134/S1075700723060072