



## © IRENA 2022

Если не указано иное, материалы, представленные в настоящей публикации, можно свободно использовать, распространять, копировать, воспроизводить, печатать и (или) хранить при условии надлежащей ссылки на агентство IRENA как на источник и владельца авторских прав. К материалам в настоящей публикации, авторство которых принадлежит третьим лицам, могут применяться отдельные условия использования и ограничения, и для использования таких материалов может потребоваться соответствующее предварительное разрешение от таких третьих лиц.

**Цитирование:** IRENA (2022), «**Геополитические аспекты трансформации энергетики: водородный фактор**», Международное агентство по возобновляемым источникам энергии, Абу-Даби.

**ISBN:** 978-92-9260-456-1

Данный документ является переводом исследования "Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor." ISBN: 978-92-9260-370-0

(2022). В случае расхождений между переводом и оригиналом на английском языке преимущественную силу имеет текст на английском языке.

Доступно для скачивания: [www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications)

Для получения дополнительной информации или для обратной связи: [info@irena.org](mailto:info@irena.org)

### ОБ АГЕНТСТВЕ IRENA

Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA) – это межправительственная организация, которая помогает странам переходить на модель устойчивого энергетического будущего и является основной платформой для международного сотрудничества, центром передового опыта и источником информации о политике, технологиях, ресурсах и финансах в сфере возобновляемой энергии. Агентство IRENA продвигает активное внедрение и устойчивое использование всех видов возобновляемой энергетики, включая биоэнергетику, геотермальную энергетику, гидроэнергетику, океанскую, солнечную и ветряную энергетику, с целью обеспечения устойчивого развития, доступа к энергии, энергетической безопасности и экономического роста и процветания в условиях низкоуглеродной экономики.

[www.irena.org](http://www.irena.org)

### ОТКАЗ ОТ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

Настоящая публикация и материалы в ней предоставляются «как есть». Агентство IRENA предприняло все разумные предосторожности, чтобы обеспечить достоверность материалов в настоящей публикации. Однако ни агентство IRENA, ни кто-либо из его сотрудников, агентов, источников данных или другого стороннего содержимого не предоставляют каких-либо официальных или подразумеваемых гарантий, и они отказываются от какой-либо ответственности или обязательств в отношении последствий использования данной публикации или содержащихся в ней материалов.

Информация, содержащаяся в настоящей публикации, не обязательно отражает позицию всех членов агентства IRENA. Упоминание конкретных компаний, проектов или продуктов не означает, что они поддерживаются или рекомендуются агентством IRENA вместо других компаний, проектов или продуктов подобного же характера, которые не упомянуты. Используемые обозначения и способ предоставления материалов в настоящей публикации не указывают на какие-либо суждения со стороны агентства IRENA в отношении юридического статуса каких-либо регионов, стран, территорий, городов или районов либо их властей, а также в отношении демаркации границ.



# ПРЕДИСЛОВИЕ

Ускорение темпов внедрения возобновляемых источников энергии запустило глобальное преобразование энергетических систем с далеко идущими геополитическими последствиями. Доклад «Новый мир», выпущенный Глобальной комиссией по геополитике энергетической трансформации агентства IRENA в 2019 году, был первым исследованием в этой области. В нём рассматривалось, как наступление новой энергетической эпохи изменит взаимоотношения между государствами и сообществами и приведёт к «новому миру» электроэнергетики, безопасности, энергетической независимости и процветания.

Учитывая быстрые темпы изменений, очень важно отслеживать геополитические движущие факторы и последствия энергетического перехода, быть в курсе новых разработок и преобразований и активно участвовать в формировании будущего. В 2020 году Ассамблея IRENA поручила Агентству развить это направление работы в контексте Рамочного совещания\* по геополитическим аспектам трансформации энергетики. Учитывая всплеск интереса к водороду в последнее время, он был обозначен как важная область для дальнейшего анализа. В прошлом водород неоднократно вызывал сильный интерес, но оставался узкой темой в общемировом энергетическом дискурсе. Сегодня ему уделяется беспрецедентное внимание в рамках энергетической политики в связи с его ключевой ролью в декарбонизации сложно декарбонизируемых секторов.

До сих пор не вполне ясно, как будет развиваться рынок водорода, кто займёт лидирующие позиции на этом рынке и какие могут возникнуть геополитические последствия. При подготовке данного доклада агентство IRENA провело глубокий анализ возможного развития соответствующих факторов неопределённости. Многие будут зависеть от того, какие нормативно-правовые основы будут приняты правительствами разных стран, в том числе какие стимулирующие меры будут выбраны на фоне социальных и экономических последствий глобальной пандемии, всё более очевидного воздействия на климат и насущной необходимости сократить разрыв между богатыми и бедными.

В «Прогнозе преобразования мировой энергетической системы» агентства IRENA предполагается, что на водород может прийти до 12 процентов конечного энергопотребления к 2050 году. Чтобы этого достичь, потребуется правильно расставить приоритеты, особенно в самом начале, когда рынки находятся в процессе развития, а издержки остаются высокими. При этом положительный эффект от использования водорода в рамках усилий, направленных на смягчение изменений климата и развитие, будет возможен только при наличии прозрачных и надёжных правил и стандартов, а также согласованной системы, выходящей за национальные, региональные и отраслевые рамки. И что самое главное, благодаря международному сотрудничеству развивающийся рынок водорода может стать одновременно децентрализованным и инклюзивным, с широкими возможностями как для развитых, так и для развивающихся стран.

Нам ещё многое предстоит сделать. Например, как раз когда начиналась Конференция ООН по изменению климата в Глазго в октябре 2021 года, мировые энергетические рынки охватил энергетический кризис. Колебания цен на нефть и газ привели к необходимости принятия срочных мер по смягчению его последствий для производителей и потребителей по всему миру. Всё это служит суровым напоминанием о неизменности центральной позиции ископаемых видов топлива в геополитике энергетики. Это также подчёркивает необходимость срочного перехода к стойким энергетическим системам в соответствии с задачами в области климата и развития, изложенными в Парижском соглашении и в Повестке дня ООН в области устойчивого развития на период до 2030 года.

Сегодня у правительств разных стран есть уникальная возможность оформить эпоху водорода, влияя на организацию рынков, поддерживающих трансформацию энергетики, при этом избегая нынешних ограничений и неэффективных решений, уменьшая неравенство и влияя на результаты геополитики в направлении более чистых и справедливых энергетических систем. Сложности многочисленны, но многочисленны и возможности. Надеемся, что этот доклад поможет лицам, ответственным за разработку политики, а также заинтересованным сторонам эффективно ориентироваться в новых реалиях, смягчать риски и преодолевать препятствия в ближайшие годы.



**Франческо  
Ла Камера**

*Генеральный директор  
Международное агентство  
по возобновляемым  
источникам энергии*

\* Рамочные совещания агентства IRENA представляют собой платформы для государственных должностных лиц, представителей частных компаний и других участников и предназначены для обмена опытом, проведения углублённой аналитической работы и содействия международному сотрудничеству в области энергетического перехода.

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	03
Благодарности .....	09
<b>КРАТКИЙ ОБЗОР ДЛЯ ЛИЦ, ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА РАЗРАБОТКУ ПОЛИТИКИ</b> .....	10
<hr/>	
<b>01 ВВЕДЕНИЕ</b> .....	18
1.1 ПРИХОД ЧИСТОГО ВОДОРОДА .....	18
1.2 ГЕОПОЛИТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ЧИСТОГО ВОДОРОДА .....	21
1.3 ЦЕЛИ ДОКЛАДА .....	22
<b>02 РОЛЬ ВОДОРОДА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПЕРЕХОДЕ</b> .....	24
2.1 Что такое водород? .....	24
2.2 Основные способы производства .....	26
2.3 Области применения водорода и расстановка приоритетов .....	29
2.4 Препятствия для расширенного использования водорода .....	31
2.5 Перспективы международной торговли водородом .....	33
<b>03 ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОПОЛИТИЧЕСКОЙ КАРТЫ</b> .....	38
3.1 Лидеры в области политики и ведущие рынки .....	39
3.2 Новый класс экспортёров энергоресурсов .....	45
3.3 Стратегия энергетического перехода для производителей ископаемых видов топлива .....	49
3.4 Появление новых лидеров в сфере технологий .....	55
3.5 Промышленное развитие в странах, богатых возобновляемыми источниками энергии .....	65





<b>04</b>	<b>ТОРГОВЛЯ, БЕЗОПАСНОСТЬ И ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЬ</b> .....	68
	4.1 Новая география торговли .....	70
	4.2 Формирование правил игры .....	74
	4.3 Водородная дипломатия .....	76
	4.4 Изменения в политических отношениях .....	78
	4.5 Повышение энергетической безопасности .....	81
	4.6 Торговые риски и уязвимости .....	85
<b>05</b>	<b>ПЕРВОПРИЧИНЫ ГЕОПОЛИТИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ – И РОЛЬ ВОДОРОДА В РЕШЕНИИ ЭТОЙ ПРОБЛЕМЫ</b> .....	92
	5.1 Социально-политические преобразования .....	93
	5.2 Изменение климата, нехватка водных ресурсов и отсутствие продовольственной безопасности .....	96
	5.3 Водород и развивающиеся страны .....	102
<b>06</b>	<b>СООБРАЖЕНИЯ ПОЛИТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ</b> .....	104
	Использованная литература .....	108



## СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ

<b>Рисунок 5.1</b>	Изменения в стоимостном объёме торговли энергоресурсами с 2020 г. по 2050 г.....	11
<b>Рисунок 5.2</b>	Расширяющаяся сеть маршрутов, планов и соглашений по торговле водородом.....	12
<b>Рисунок 5.3</b>	Приоритеты политики в сфере чистого водорода.....	14
<hr/>		
<b>Рисунок 1.1</b>	Оценка глобального спроса на водород в 2050 г.....	20
<b>Рисунок 2.1</b>	Потребление водорода в 2020 г.....	25
<b>Рисунок 2.2</b>	Выбранная типология производства водорода с цветовой кодировкой.....	26
<b>Рисунок 2.3</b>	Потенциальные области применения чистого водорода.....	29
<b>Рисунок 2.4</b>	Приоритеты политики в сфере чистого водорода.....	30
<b>Рисунок 2.5</b>	Основные презюмируемые препятствия для разработки водородной политики и стратегий.....	32
<b>Рисунок 2.6</b>	Мировой технический потенциал солнечной энергии.....	33
<b>Рисунок 2.7</b>	Мировой технический потенциал ветровой энергии.....	34
<b>Рисунок 2.8</b>	Рентабельность разных вариантов транспортировки с учётом объёмов и расстояний.....	35
<b>Рисунок 2.9</b>	Расширяющаяся сеть маршрутов, планов и соглашений по торговле водородом.....	37
<b>Рисунок 3.1</b>	Готовые и разрабатываемые водородные стратегии, октябрь 2021 г.....	39
<b>Рисунок 3.2</b>	Потенциально доступное среднегодовое финансирование водородных проектов, 2021-2030 гг.....	42
<b>Рисунок 3.3</b>	Проекты и инвестиции в чистый водород, по состоянию на ноябрь 2021 г.....	43
<b>Рисунок 3.4</b>	Технические возможности для производства «зелёного» водорода по цене ниже 1,5 долл. США/кг к 2050 г.....	45
<b>Рисунок 3.5</b>	Влияние предполагаемых издержек на производство водорода в отдельных странах.....	47
<b>Рисунок 3.6</b>	Риск незадействованных активов для крупнейших нетто-экспортёров ископаемых видов топлива, 2019 г.....	50
<b>Рисунок 3.7</b>	Мнения экспертов о водородных стратегиях и влиянии на производителей нефти и газа.....	51
<b>Рисунок 3.8</b>	Мнения экспертов о будущих водородных доходах и структуре рынка.....	54
<b>Рисунок 3.9</b>	Возможности для лидерства в сфере технологий в производственно-сбытовых цепочках «зелёного» водорода.....	55
<b>Рисунок 3.10</b>	Географическое распределение семейств патентов-аналогов, связанных с водородом, 2010-2020 гг.....	56
<b>Рисунок 3.11</b>	Поток изобретений в области водородных технологий, 2010-2020 гг.....	58
<b>Рисунок 3.12</b>	Расчётный потенциал рынка в отношении водородного оборудования и компонентов, 2050 г.....	59
<b>Рисунок 3.13</b>	Расчётные мировые мощности по производству электролизёров, 2021-2024 гг., на основе инвестиционных планов.....	61
<b>Рисунок 3.14</b>	Продажи топливных элементов по регионам их внедрения, 2016-2020 гг.....	63

## СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ (продолжение)

<b>Рисунок 4.1</b>	Мнения стран-членов агентства IRENA о влиянии водорода на внешнюю политику к 2030 г. . . . .	69
<b>Рисунок 4.2</b>	Изменения в стоимостном объёме торговли энергоресурсами с 2020 г. по 2050 г. . . . .	70
<b>Рисунок 4.3</b>	Мировая карта магистральных трубопроводов природного газа . . . . .	73
<b>Рисунок 4.4</b>	Возможные водородные маршруты в Африке вдоль существующих и будущих трансфриканских автомагистралей . . . . .	75
<b>Рисунок 4.5</b>	Отдельные двусторонние торговые соглашения и протоколы о намерениях между странами, о которых объявлено по состоянию на ноябрь 2021 г. . . . .	77
<b>Рисунок 4.6</b>	Двадцать крупнейших в мире объявленных проектов исключительного масштаба в области «зелёного» водорода . . . . .	87
<b>Рисунок 4.7</b>	Ведущие производители дефицитных материалов, применяемых в электролизёрах . . . . .	91
<b>Рисунок 5.1</b>	Мнения экспертов о влиянии водорода на отдельные результаты устойчивого развития к 2050 г. . . . .	93
<b>Рисунок 5.2</b>	Страны, в которых «зелёный» водород возможно может стать дешевле «синего» водорода, по годам . . . . .	94
<b>Рисунок 5.3</b>	Потребление воды для производства водорода в 2050 г. по сравнению с отдельными отраслями сегодня . . . . .	98
<b>Рисунок 5.4</b>	Тепловая карта, отражающая уровни нехватки водных ресурсов . . . . .	99



© Dllok Klaisat.porn / istock



## СПИСОК ТАБЛИЦ

<b>Таблица 2.1</b>	Сравнение основных технологий электролизёров .....	28
<b>Таблица 3.1</b>	Исторические примеры крупномасштабных предприятий по производству водорода путём электролиза .....	60
<b>Таблица 3.2</b>	Экономические факторы при выборе места производства .....	66
<b>Таблица 5.1</b>	Семь угроз стабильности в результате изменения климата .....	96

## СПИСОК ВСТАВОК

<b>Вставка 1.1</b>	Ключевые термины, используемые в данном докладе .....	19
<b>Вставка 1.2</b>	Основные прогнозы по использованию водорода к 2050 г. согласно сценарию агентства IRENA по ограничению глобального потепления 1,5 °С .....	23
<b>Вставка 2.1</b>	Что такое электролизёр? .....	28
<b>Вставка 2.2</b>	Геополитические аспекты исследований по водороду .....	32
<b>Вставка 2.3</b>	Три основных способа морской транспортировки водорода .....	36
<b>Вставка 3.1</b>	Ранние последователи? Перспективы водорода в отдельных лидирующих странах и регионах .....	40
<b>Вставка 3.2</b>	Водородные проекты в Африке .....	44
<b>Вставка 3.3</b>	Важность предполагаемых капитальных затрат для прогнозов по торговле водородом .....	46
<b>Вставка 3.4</b>	От импортёра энергоресурсов к экспортёру? Водородные проекты в отдельных странах-импортёрах ископаемых видов топлива с потенциалом экспорта «зелёного» водорода .....	48
<b>Вставка 3.5</b>	Поворот в сторону водорода? Водородные стратегии в отдельных странах-экспортёрах ископаемых видов топлива .....	52
<b>Вставка 4.1</b>	Инфраструктурные возможности для Африки в секторе морской транспортировки .....	72
<b>Вставка 4.2</b>	Возникновение водородной дипломатии .....	79
<b>Вставка 4.3</b>	Уменьшение риска объёмов и цен в торговле водородом: уроки, усвоенные на примере развития рынка СПГ .....	86





## БЛАГОДАРНОСТИ

Данный доклад был подготовлен под руководством Элизабет Пресс (Elizabeth Press), которая также разработала разделы, посвящённые обзорной информации и соображениям политики. Среди авторов доклада – Тейс ван де Грааф (Thijs Van de Graaf) (консультант и ведущий автор агентства IRENA), Хериб Бланко (Herib Blanco), Эмануэле Бьянко (Emanuele Bianco) и Вайман Тсанг (Waiman Tsang). Рабия Феррухи (Rabia Ferroukhi) и Дольф Гилен (Dolf Gielen) предоставили экспертные рекомендации и осуществляли общий контроль.

Ценный вклад также внесли коллеги агентства IRENA: Роланд Рош (Roland Roesch), Франсиско Бошел (Francisco Boshell), Франческо Пасимени (Francesco Pasimeni), Пол Комор (Paul Komor), Анастасия Кефалиду (Anastasia Kefalidou), Клэр Кисс (Claire Kiss), Эмануэле Таиби (Emanuele Taibi), Уте Колльер (Ute Collier), Кэтрин Дэниел (Kathleen Daniel), Имен Гербудж (Imen Gherboudj), Барбара Джинкс (Barbara Jinks), Джеффри Лу (Jeffrey Lu), Стефано Маргуччо (Stefano Marguccio) и Келли Ригг (Kelly Rigg) (консультант агентства IRENA).

Многие государственные чиновники и международные эксперты также внесли свой вклад в подготовку доклада и участвовали в рецензировании его проекта. Их комментарии и советы имели огромное значение. Среди них – Ронни Белманс (Ronnie Belmans) (Лёвенский католический университет), Леонардо Бельтрано (Leonardo Beltrano) (Колумбийский центр глобальной энергетической политики), Питер Беттс (Peter Betts), Кингсмилл Бонд (Kingsmill Bond) (Carbon Tracker), Гуго Брауер (Hugo Brouwer) (Министерство иностранных дел Нидерландов), Мелинда Крейн (Melinda Crane), Маттиас Дойч (Matthias Deutsch) (Agora Energiewende), Гонсало Эскрибано (Gonzalo Escribano) (Королевский институт международных и стратегических исследований Элькано (Real Instituto Elcano)), Хан Феенстра (Han Feenstra) (Министерство экономики и климатической политики Нидерландов), Лиза Фишер (Lisa Fischer) (E3G), Гневомир Флис (Gniewomir Flis) (Agora Energiewende), Джонатан Гавента (Jonathan Gaventa) (E3G), Ханс Олаф Ибрекк (Hans Olav Ibrekk) (Министерство иностранных дел Норвегии), Рууд Кемпенер (Ruud Kempener) (Генеральный директорат по энергетике, Европейская комиссия), Хольгер Клитцинг (Holger Klitzing) (Федеральное министерство иностранных дел Германии), Джеймс Мнупе (James Mnyupe) (Канцелярия президента Намибии), Пол Мунних (Paul Munnich) (Agora Energiewende), Александро Нуньес Хименес (Alejandro Nuñez-Jimenez) (Гарвардский университет и Швейцарская высшая техническая школа в Цюрихе), Индра Оверланд (Indra Overland) (NUP), Карстен Зах (Karsten Sach) (Министерство окружающей среды Германии), Беатрикс Шмюллинг (Beatrix Schmuelling) (Министерство изменения климата и окружающей среды ОАЭ), Гриффин Томпсон (Griffin Thompson) (Чикагский университет Лойолы), Никос Цафос (Nikos Tsafos) (Центр стратегических и международных исследований, CSIS), Татьяна Улкина (Tatiana Ulkina) (SNAM), Коби ван дер Линде (Coby van der Linde) (Институт международных отношений Нидерландов «Клингендель» (Clingendael)), Кирстен Вестфаль (Kirsten Westphal) (H2Global Stiftung), Ральф Вермеер (Ralf Vermeer) (Министерство иностранных дел Нидерландов) и Фрэнк Ваутерс (Frank Wouters) (Reliance Industries). Кроме того, ценный вклад в этот доклад внесло Рамочное совещание по геополитическим аспектам трансформации энергетики агентства IRENA, которое дважды проводилось для обсуждения этой темы.

Многие эксперты также предоставляли ценные комментарии и принимали участие в исследованиях, которые послужили источником информации при разработке доклада. Среди них<sup>1</sup> – Марко Барони (Marco Baroni), Эрин М. Блантон (Erin M. Blanton), Ноам Бусидан (Noam Boussidan), Джеймс Боуэн (James Bowen), Майкл Брэдшо (Michael Bradshaw), Энди Калиц (Andy Calitz), Килиан Кроун (Kilian Crone), Фернандо де Систернес (Fernando de Sisternes), Кристиан Дауни (Christian Downie), Решма Фрэнси (Reshma Francy), Джулио Фридрихманн (Хулио Фридрихманн), Арунабха Гхош (Arunabha Ghosh), Марко Джули (Marco Giuli), Крис Гудолл (Chris Goodall), Мария А. Гвинн (Maria A. Gwynn), Лиор Херман (Lior Herman), Ваутер Якобс (Wouter Jacobs), Сохбет Карбуз (Sohbet Karbuz), Тьерри Леперк (Thierry Lepercq), Робин Миллс (Robin Mills), Элеонора Моро (Eleonora Moro), Моника Нагашима (Monica Nagashima), Мишель Нуссан (Michel Noussan), Mostefa Ouki (Мостефа Оуки), Хорхе Пена (Jorge Pena), Седрик Филибер (Cédric Phillibert), Райнер Китцов (Rainer Quitzow), Аурангзеб Куреши (Aurangzeb Qureshi), Элисон Рив (Alison Reeve), Барис Санли (Baris Sanli), Массимо Сантарелли (Massimo Santarelli), Роберто Шэффер (Roberto Schaeffer), Даниэль Шолтен (Daniel Scholten), Россана Шита (Rossana Scita), Радия Седאוуи (Radia Sedaoui), Аднан Шихаб-Элдин (Adnan Shihabeldin), Том Смолинка (Tom Smolinka), Александр Скло (Alexandre Szklo), Рудигер Чернинг (Rudiger Tscherning), Фрэнк Умбах (Frank Umbach), Пол ван Сон (Paul van Son), Ад ван Вейк (Ad van Wijk) и Сирил Виддерсховен (Cyril Widdershoven).

Публикация, коммуникации и редакторская поддержка были предоставлены Стефани Кларк (Stephanie Clarke), Дарией Гаццола (Daria Gazzola), Николь Бокстоллер (Nicole Bockstaller) и Дамианом Брэнди (Damian Brandy). Художественно-техническое редактирование – Стивен Б. Кеннеди (Steven B. Kennedy). Графический дизайн выполнила компания weeks.de Werbeagentur GmbH.

Агентство IRENA выражает благодарность Федеральному министерству иностранных дел Германии и Министерству иностранных дел Норвегии за их великодушную поддержку, благодаря которой стало возможным опубликовать данный доклад.

<sup>1</sup> Указанные в докладе лица – эксперты, давшие согласие на публикацию своего имени.

# Краткий обзор для лиц, ответственных за разработку политики

**Происходящий в настоящее время энергетический переход беспрецедентен по своим масштабам и огромному влиянию на установившиеся социально-экономические, технологические и геополитические тенденции по всему миру.** В настоящий момент возобновляемые источники энергии в сочетании с энергоэффективностью стоят на первом плане глобального энергетического перехода с далеко идущими последствиями. Этот переход – не просто замена топлива, а переход к новой системе, сопровождающийся соответствующими потрясениями в политической, технической, экологической и экономической сферах. Основная цель данного доклада – определить, как и насколько использование водорода усугубляет или смягчает такие потрясения.

**Водород, которого до последнего времени не было в схеме чистой энергетики, в ближайшие годы, вероятно, приведёт к дальнейшим изменениям в производственно-сбытовых энергетических цепочках.** Острейшая проблема изменения климата стала основной причиной обновлённого политического интереса к водороду. Согласно стратегии агентства IRENA по ограничению глобального потепления 1,5 °C, чистый водород<sup>1</sup> способен покрыть до 12% конечного энергопотребления к 2050 г. Его большая часть производилась бы с использованием возобновляемых источников энергии, а остальная – из газа при улавливании и хранении углерода.

**Водород, вероятно, будет влиять на географию торговли энергоресурсами, приводя к дальнейшей регионализации энергетических связей.** Учитывая падение издержек возобновляемой энергии и при этом высокие затраты на транспортировку водорода, формирующаяся геополитическая карта, вероятно, будет отражать растущую регионализацию энергетических связей. Возобновляемые источники энергии могут использоваться в каждой стране, а возобновляемую электроэнергию можно экспортировать в соседние страны по линиям электропередач. Кроме того, водород может облегчить транспортировку энергии из возобновляемых источников на более длинные расстояния по трубопроводам и морем, тем самым задействуя ранее неиспользовавшиеся ресурсы ВИЭ в отдалённых регионах. С помощью технических изменений некоторые существующие трубопроводы природного газа можно приспособить для транспортировки водорода.

**Страны, где в изобилии имеется недорогая электроэнергия из возобновляемых источников, могли бы стать производителями «зелёного» водорода, что повлекло бы за собой соответствующие геоэкономические и геополитические изменения.** «Зелёный» водород может быть наиболее экономичным в местах с оптимальным сочетанием богатых возобновляемых ресурсов, площадей для размещения солнечных или ветровых электростанций, доступа к водным ресурсам, а также возможности экспорта в крупные центры спроса. Там, где используются эти факторы, могли бы возникнуть новые электроэнергетические узлы, которые станут центрами производства и потребления водорода.

**Водородный бизнес будет более конкурентным и менее доходным, чем нефть и газ.** Чистый водород не будет приносить прибыль, сравнимую с сегодняшней прибылью от нефти и газа. Водород – это продукт преобразования, а не добычи, и может производиться на конкурентной основе во многих местах. Это ограничит возможности получения экономической ренты, сопоставимой с той, которую приносит добыча ископаемых видов топлива и на которую сегодня приходится порядка 2% мирового ВВП. Кроме того, по мере снижения стоимости «зелёного» водорода на рынке будут появляться новые и разнообразные участники, благодаря чему водород станет ещё более конкурентным.

<sup>1</sup> В настоящем докладе понятие «чистый водород» обозначает комбинацию «зелёного» и «синего» водорода. См. также рисунок 2.2.

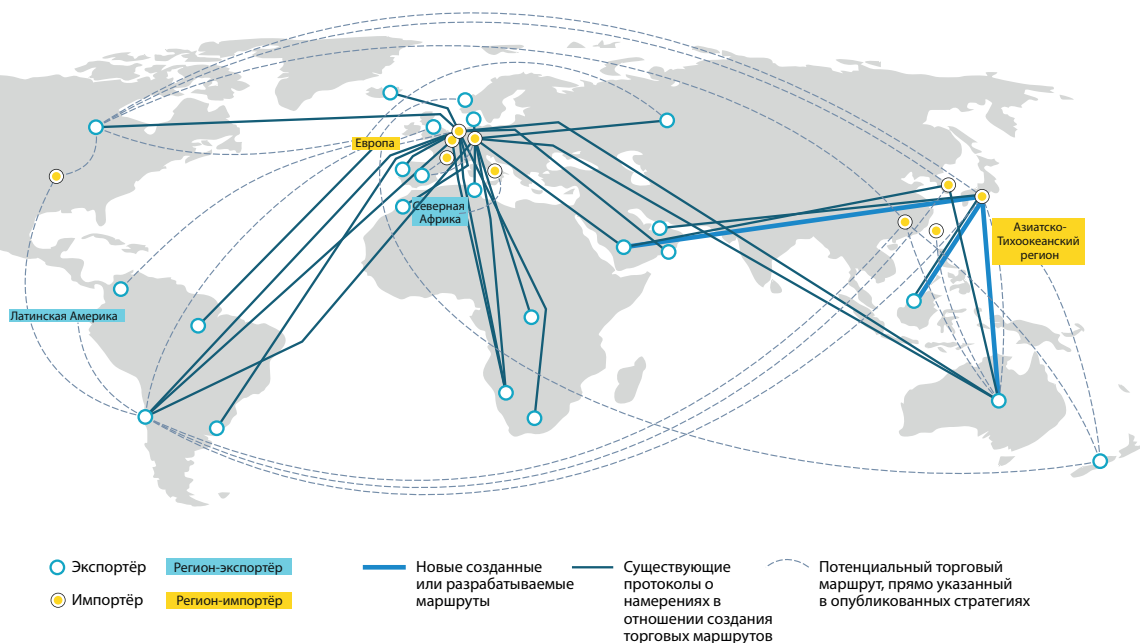


**Рисунок S.1** Изменения в стоимостном объёме торговли энергоресурсами с 2020 г. по 2050 г.



**Водородные торговые и инвестиционные потоки приведут к появлению новых моделей взаимозависимости и изменениям в двусторонних отношениях.** Быстро растущее число двусторонних сделок указывает на их отличие от деловых отношений 20-го века, основанных на углеводородных энергетических ресурсах. Более чем у 30 стран и регионов есть водородные стратегии, включающие планы импорта или экспорта, что указывает на то, что трансграничная торговля водородом должна значительно возрасти. Страны, которые традиционно не торговали энергоресурсами, устанавливают двусторонние отношения, построенные вокруг связанных с водородом технологий и молекул. По мере изменения экономических связей между странами также может меняться и динамика их политических отношений.



**Рисунок S.2** Расширяющаяся сеть маршрутов, планов и соглашений по торговле водородом

Источник карты: Natural Earth, 2021 г.

Примечание: информация на этом рисунке основана на данных, содержащихся в правительственных документах на момент написания.

Отказ от ответственности: данная карта приведена исключительно в целях наглядности. Показанные на карте границы и названия не подразумевают какую-либо поддержку или принятие их агентством IRENA.

### **Вряде стран водородная дипломатия становится стандартной составляющей экономической дипломатии.**

Доступ к водороду часто рассматривается как элемент энергетической безопасности и общей национальной стабильности, особенно для отраслей, где другие решения неосуществимы или экономически нецелесообразны. Ряд стран, которые, как ожидается, могут стать импортёрами, уже занимаются целевой водородной дипломатией. Первопроходцами здесь стали Германия и Япония, но близко за ними следуют и другие страны. Потенциальные экспортёры используют схожие стратегии, многие из них включают водород (особенно «зелёный») в дипломатические переговоры наивысшего уровня.

### **Чистый водород привлекает экспортёров ископаемых видов топлива как способ диверсифицировать их экономику.**

Многие нынешние экспортёры переключают своё внимание на чистый водород с целью развития новых экспортных отраслей. Они могут эффективно использовать действующую энергетическую инфраструктуру, квалифицированную рабочую силу и существующие связи в сфере торговли энергоресурсами. Хотя «синий» водород и кажется самым подходящим вариантом, у многих стран-производителей ископаемых видов топлива также есть богатый потенциал возобновляемых источников энергии для того, чтобы сразу перейти к «зелёному» варианту водорода. В Дорожной карте лидерства ОАЭ в сфере водорода (United Arab Emirates' Hydrogen Leadership Roadmap) прямо обозначен такой двойной подход, который также рассматривается несколькими другими странами, включая Австралию, Оман и Саудовскую Аравию. Тем не менее, производителям ископаемых видов топлива следует продолжать разрабатывать всеобъемлющие стратегии экономического перехода, учитывая тот факт, что водород не сможет компенсировать им потерю прибыли.



**Технические возможности для производства «зелёной» электроэнергии и, в свою очередь, больших объёмов «зелёного» водорода превышают прогнозируемый глобальный спрос на несколько порядков.**

Многие страны заявили о своём стремлении стать экспортёрами водорода, что снижает вероятность концентрации экспорта. Судя по их стратегиям и растущему количеству двусторонних сделок, даже такие нетто-импортёры энергоресурсов, как Чили, Марокко и Намибия, нацелены стать экспортёрами «зелёного» водорода. Однако поставки водорода будут ограничены темпами привлечения капитала и себестоимостью производства, особенно в тех случаях, где нет гарантии наличия долгосрочных рынков.

**У Африки, Северной и Южной Америки, Ближнего Востока и Океании самый высокий технический потенциал для производства «зелёного» водорода.**

Однако возможности производства больших объёмов недорогого «зелёного» водорода широко варьируются. Странам придётся разработать свои стратегии с учётом более широких социальных и экономических приоритетов, включая способность декарбонизировать свои энергетические системы или решать проблемы бедности и доступа к энергоресурсам, которые в настоящее время преобладают в более чем 80 странах мира. Наличие доступа к богатым возобновляемым ресурсам является преимуществом в «гонке» за чистый водород, но этого может быть недостаточно. Здесь в игру вступает множество других факторов, в том числе существующая инфраструктура и текущий энергетический баланс, а также стоимость капитала и доступ к необходимым технологиям. Возможность реализации технического потенциала также зависит от таких «мягких» факторов, как поддержка правительства, инвестиционный климат и политическая стабильность.

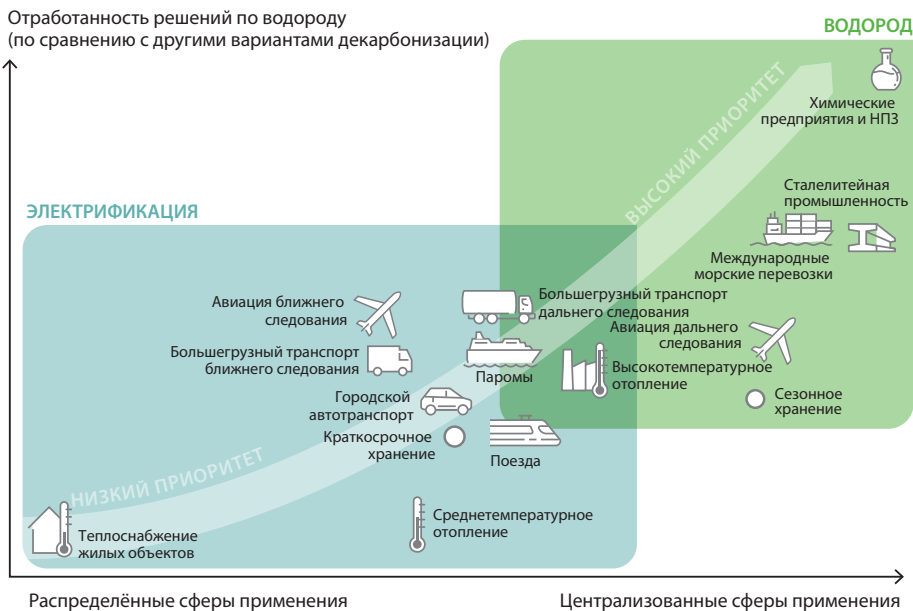
**Более высокие затраты на проектное финансирование необязательно препятствуют инвестициям в страны с более высокими рисками.**

Сектор разведки и добычи нефти и газа демонстрирует, что там, где можно получить достаточную прибыль, инвестиции будут поступать независимо от имеющихся в стране рисков. То же самое должно относиться к странам с низкими потенциальными затратами для производства «зелёного» водорода. Конечно же, существуют и ограничения. Страны, в которых происходят беспорядки и политическая ситуация нестабильна, несмотря на свой значительный потенциал вряд ли смогут реализовать свои инвестиционные возможности из-за огромных рисков для ведения бизнеса в таких регионах.



**Двадцатые годы двадцать первого века могут стать эрой большой конкуренции за лидерство в сфере технологий, так как, вероятно, издержки будут резко сокращаться по мере приобретения опыта и масштабирования необходимой инфраструктуры.** Геополитические аспекты чистого водорода, вероятно, будут проявляться поэтапно. Согласно прогнозам, «зелёный» водород начнёт конкурировать с «синим» водородом по своей стоимости к концу этого десятилетия. Вероятно, это скорее произойдёт в таких странах, как Китай (благодаря его дешёвым электролизёрам) или Бразилия и Индия (с дешёвыми возобновляемыми источниками энергии и относительно высокими ценами на газ). «Зелёный» водород уже предлагался по более доступной цене, чем «серый» водород, в Европе в 2021 году во время резкого скачка цен на природный газ. Но развитие будет в значительной степени зависеть от предсказуемого спроса, особенно в сложно декарбонизируемых секторах, где какие-либо альтернативы отсутствуют.

**Рисунок S.3** Приоритеты политики в сфере чистого водорода



Источники: IRENA (ещё не опубликовано-б).



**Трансграничная торговля водородом будет расти в 2030-х гг. такими же темпами, как и конкурентоспособность «зелёного» водорода.** Согласно многим сценариям декарбонизации, спрос начнёт расти с 2035 года. Агентство IRENA предполагает, что две трети производимого «зелёного» водорода в 2050 г. будут использоваться локально, а одна треть – продаваться в другие страны. Трубопроводы, включая перефилированные трубопроводы природного газа, вероятно, будут содействовать торговле половиной этого объёма. Остальной объём будет транспортироваться морем в виде производных водорода, в первую очередь аммиака.

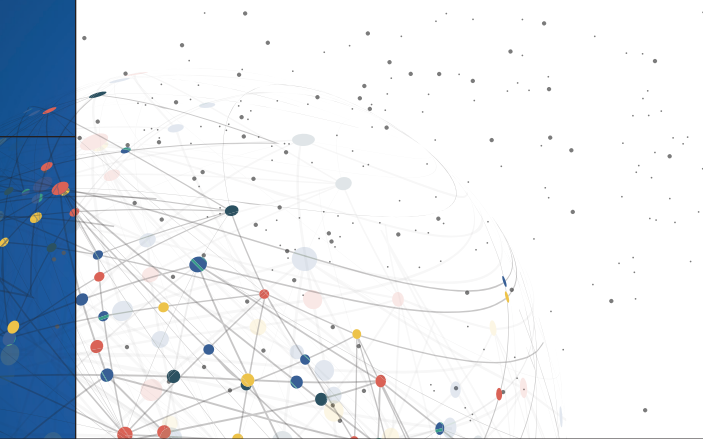
**В кратко- и среднесрочной перспективе отдельные страны и регионы могут утвердить своё лидерство в сфере технологий и определить правила растущего рынка.** Участие стран в цепочке производства и сбыта водорода может стимулировать экономическую конкуренцию. Прямые экономические ставки высоки, а рынок обладает значительным потенциалом. В долгосрочной перспективе страны, изобилующие возобновляемыми ресурсами, могли бы стать центрами «зелёной» индустриализации и использовать свой потенциал для привлечения энергоёмких отраслей.

**Производство оборудования даёт возможность получать прибыль в ближайшие годы и десятилетия.** Водородная производственно-сбытовая цепочка обширна, и основная часть инвестиций потребуется для возобновляемой энергетики. Согласно оценкам, к середине столетия потенциал рынка электролизёров для такой цепочки может составить 50-60 млрд долл. США, а потенциал рынка топливных элементов – 21-25 млрд долл. США. Китай, Европа и Япония уже вырвались вперёд в производстве и продаже электролизёров, но этот рынок всё ещё находится на начальной стадии своего развития и относительно невелик. Инновации и новые технологии способны изменить текущую картину производства.

**Любая форма водорода может укрепить энергетическую независимость и устойчивость страны, но основные преимущества всё-таки будут исходить от «зелёного» водорода.** Сегодня существует три основных способа, с помощью которых водород может содействовать энергетической безопасности: 1) снижение зависимости от импорта 2) уменьшение волатильности цен и 3) повышение гибкости и стойкости энергетической системы благодаря диверсификации. Большинство этих преимуществ связано с «зелёным» водородом. Напротив, «синий» водород повторил бы модели газовых рынков и привёл бы к зависимости от импорта и колебаниям рынка. Кроме того, ожидаемое сокращение себестоимости «зелёного» водорода означает, что инвестиции в цепочки поставок, основанные на ископаемых видах топлива (особенно активы, которые планируется эксплуатировать многие годы), могут стать незадействованными.

**Поскольку технологии для производства водорода и возобновляемой энергии требуют соответствующего сырья, всё больше внимания, вероятно, будет уделяться материальной обеспеченности.** Хотя в настоящее время геологические запасы большинства минералов и металлов достаточны, рынки могут стать резко дефицитными в связи со стремительно растущим спросом и долгими сроками реализации проектов по добыче и переработке. Сравнительно небольшие изменения в предложении или спросе способны привести к серьёзным колебаниям цен. Такие колебания могут отразиться на всех звеньях цепочек поставки водорода и повлиять на общую стоимость оборудования, а также на доходы добывающих компаний и экспортёров сырья. Проблемы с цепочками поставок, вызванные COVID-19, также дают полезный опыт в контексте рассмотрения возможных рисков помимо уже известных.

**Маловероятно, что водородные торговые потоки будут использоваться в качестве инструмента давления или для образования картелей.** Это объясняется тем, что водород можно производить из многих источников первичной энергии и в самых разных местах на планете. И действительно, это продукт производства, а не сырьевой материал или источник энергии. Поэтому торговые потоки «зелёной» энергии вряд ли поддадутся геополитическому влиянию так же легко, как нефть и газ. Вместе с тем, может возникнуть дефицит предложения, особенно в первые годы торговли водородом, когда количество поставщиков ограничено и основная часть сделок всё ещё регулируется двусторонними соглашениями.



**Установление правил, стандартов и системы управления для торговли водородом окажет серьёзное влияние на определение технологий, которые будут доминировать на будущих рынках.** Успех рынков чистого водорода зависит от способности устанавливать согласованные и прозрачные правила, стандарты и нормы, помогающие внедрять его использование в разных странах, регионах и отраслях. Стандарты разрабатываются для улучшения качества, безопасности и совместимости различных товаров и услуг. В то же время, расхождения в стандартах способны замедлить прогресс и привести к фрагментации рынка, подстегнуть конкуренцию между регулируемыми органами и создать торговые барьеры. Определение стандартов может стать сценой для геополитической конкуренции или международного сотрудничества. В конечном итоге, от согласованной и прозрачной глобальной системы могут выиграть все участники.

**Для отслеживания и контроля эффекта от использования водорода в контексте усилий по смягчению изменения климата потребуются сертификаты происхождения, опирающиеся на прозрачную и надёжную международную систему.** Критически важной будет прозрачность подхода к измерению выбросов. Если водородные стратегии будут продлевать использование ископаемых видов топлива и препятствовать энергоэффективности и электрификации, то возникнут хорошо известные риски «углеродной западни». Обоснованные и хорошо продуманные нормативные базы способны помочь достичь позитивного эффекта от использования водорода для сокращения выброса парниковых газов.

**Ценовая прозрачность на самых ранних этапах будет способствовать быстрому развитию глобального рынка водорода.** Валюты и ценовые механизмы, которые завладеют зарождающимся рынком, вероятно, будут иметь значительное геополитическое влияние. Выбранная валюта займёт выгодные позиции для того, чтобы стать мировым стандартом по мере расширения рынка. Связанные с такой валютой стороны будут в некоторой степени защищены от риска колебания импортной стоимости. Например, Европейский союз, который, вероятно, станет одним из основных рынков импорта, стремится деноминировать свои будущие импортные поставки водорода в евро. Более того, целесообразным или даже необходимым стало бы установление цены на углерод, чтобы «зелёный» водород смог конкурировать с «серым» вариантом и, в конечном итоге, с ископаемыми видами топлива. В этом смысле, водород может оказаться вовлечённым в более масштабные торговые углеродные войны.

**Инвестиционные решения рассчитаны на длительный срок, при этом высоки риски незадействованных активов, поэтому следует провести оценку постоянной инфраструктуры с точки зрения долгосрочной перспективы.** При принятии каждого сегодняшнего решения в области инвестирования или планирования для энергетической инфраструктуры следует учитывать, что география декарбонизированной экономики, вероятно, будет сильно отличаться от того, что кажется разумным в настоящий момент. Масштабная электрификация конечного потребления изменит структуру спроса. Что касается предложения, возобновляемый водород, вероятно, будет производиться не там, где сегодня расположены нефтяные и газовые месторождения, а в других местах. Хотя часть существующей инфраструктуры может быть приспособлена для новых целей, уже с самого начала следует учесть технические сложности и экономические затраты, необходимые для такого перепрофилирования.

**Помогая развивающимся странам внедрять водородные технологии на самых ранних этапах, можно повысить всеобщую энергетическую безопасность и одновременно предотвратить дальнейшее разделение стран по показателю декарбонизации.** Отличающийся разнообразием водородный рынок снизил бы риски цепочки поставок и повысил бы энергетическую безопасность для всех. Доступ к технологиям, обучению, наращиванию потенциала и доступному финансированию станет важнейшим условием для реализации всех возможностей водорода с целью декарбонизации мировой энергетической системы и для содействия глобальной стабильности и справедливости. Установление отношений для торговли водородом могло бы открыть новые возможности для формирования локальных цепочек производства и сбыта водорода, стимулирования «зелёных» отраслей и создания рабочих мест в странах, изобилующих возобновляемыми источниками энергии.

**Глобальные усилия должны быть сосредоточены на тех областях, которые обеспечивают непосредственные преимущества и экономию масштаба, особенно в ближайшие годы.** Определение приоритетных направлений деятельности с самым высоким спросом, для которых водород является лучшим (а, может быть, и единственным) вариантом, с большей вероятностью обеспечит экономическую эффективность и наименьшие риски на формирующихся рынках. Одним примером могла бы стать поддержка, а затем и ускорение перехода к «зелёному» водороду в промышленных системах, где водород уже используется (таких, как очистка и производство аммиака и метанола).

**В зависимости от подхода к нему водород может иметь как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивое развитие.** Концепция «безопасности человека» часто используется для описания коренных причин геополитической нестабильности и объяснения таких угроз, как изменение климата, бедность и болезни, способных нарушать мир и стабильность внутри стран и между ними. В дальнейшем важно будет лучше понять многоплановый характер глобальных угроз и уязвимостей, чтобы предвидеть и предотвратить определённые риски, которые могут возникать по мере масштабного развёртывания использования водорода.

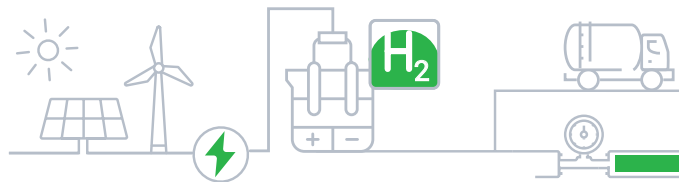


## ГЛАВА 1.

# ВВЕДЕНИЕ

## 1.1 ПРИХОД ЧИСТОГО ВОДОРОДА

В последние годы водород поднялся в повестке дня в качестве потенциального недостающего звена в решении проблемы перехода к чистой энергетике. Сегодня у всё большего числа стран есть национальная водородная программа или стратегия, и немалая часть финансовых средств, предназначенных для стимулирования и восстановления пострадавшей от COVID-19 экономики, была направлена на ускорение освоения водорода. На Конференции ООН по изменению климата (COP26), состоявшейся в Глазго в 2021 году, 32 страны и Европейский союз (ЕС) договорились о сотрудничестве с целью ускорения разработки и развёртывания технологий чистого водорода (вставка 1.1) и обеспечения «доступности возобновляемого и низкоуглеродного водорода во всём мире к 2030 году» (РКИК ООН, 2021).



# 01



### ВСТАВКА 1.1

#### КЛЮЧЕВЫЕ ТЕРМИНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ДАННОМ ДОКЛАДЕ

- **Чистый водород** означает как «зелёный» водород, так и «синий» водород. Хотя оба типа водорода могут сыграть важную роль в энергетическом переходе, в целях данного доклада «синий» водород соответствует концепции чистого водорода при условии очень низких выбросов метана и очень высокой степени улавливания углерода.
- **Низкоуглеродный водород** означает «синий» водород, не соответствующий вышеуказанным стандартам по выбросам, а также водород, получаемый с помощью электролиза с питанием от недекarbonизированной сети.
- **Производные водорода** означают получаемые на выходе молекулы, в которые может быть преобразован водород (аммиак, метанол, синтетические виды топлива). Когда такие продукты производятся с водородом в процессе электролиза, они называются продуктами "Power-to-X" (продукты преобразования электроэнергии в водород или его производные).
- **Синтетические виды топлива** означают различные газообразные и жидкие виды топлива, производимые из водорода и углерода, в том числе керосин, синтетическое дизельное топливо и др. В тех случаях, когда водород получают путём электролиза, эти виды топлива также называются «заправочная жидкость» или «электротопливо». Их можно использовать как «альтернативное» топливо, не требующее переделки систем, то есть в стандартных двигателях и инфраструктуре снабжения топливом.

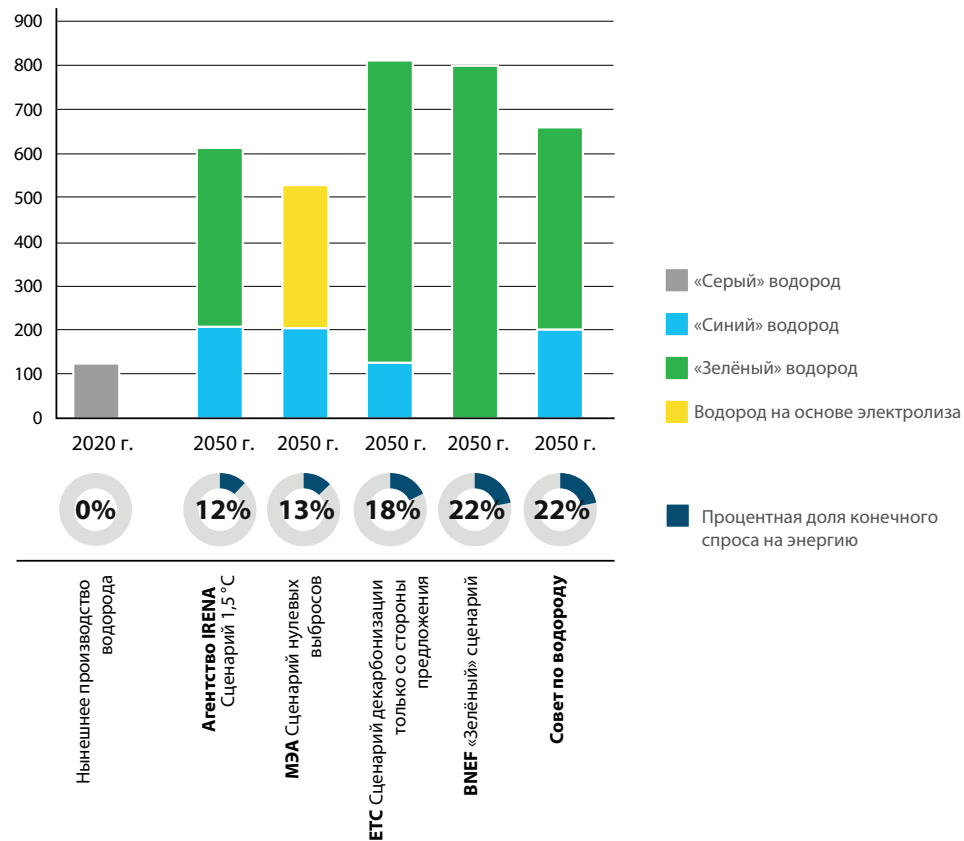
В прошлом водород неоднократно вызывал к себе интерес, но к каким-то значительным результатам это не приводило. В этот раз ситуацию меняют два фактора. Во-первых, правительства разных стран объединили свои усилия в стремлении достичь «углеродной нейтральности» к середине этого столетия (Black *et al.*, 2021). Чтобы улучшить шансы ограничения глобального повышения температуры на уровне 1,5 °C, предусмотренного Парижским соглашением 2015 года, необходимо обеспечить нулевые выбросы к 2050 г. (МГЭИК, 2021). Для этого все отрасли экономики должны сократить свои выбросы. Это относится и к тяжёлой промышленности, и к транспортным средствам дальнего следования, где в настоящее время возможности декарбонизации ограничены. Водород проявился как основное возможное решение для обеспечения сокращения выбросов в этих секторах.

Во-вторых, стремительное снижение издержек возобновляемых источников энергии и электролизёров повышает экономическую привлекательность «зелёного» водорода, т.е. водорода, получаемого путём электролиза воды с подачей возобновляемого электричества. Растущая доля переменных возобновляемых источников энергии, например, энергии ветра и фотоэлектрической солнечной энергии, также порождает спрос на эластичность и хранение, и водород может помочь в решении этой задачи. Таким образом, «зелёный» водород может дополнить и продолжить революционные преобразования, происходящие в настоящее время в сфере возобновляемой электроэнергии.

В результате влияния данных факторов водород и основанное на водороде топливо, согласно прогнозам, будут удовлетворять значительную долю конечного спроса на энергию в 2050 году, по сравнению с практически нулевой долей сегодня (рисунок 1.1). Согласно всем этим прогнозам, нынешнее производство «серого» водорода (на основе ископаемых видов топлива) будет полностью прекращено, а на рынке будет доминировать «зелёный» водород, дополняемый «синим» водородом, который основан на ископаемых видах топлива с улавливанием и хранением углерода (CCS).

**Рисунок 1.1** Оценка глобального спроса на водород в 2050 г.

Производство водорода (млн тонн)



Источники: BloombergNEF (2021a); ETC (2021); Совет по водороду (2021); IRENA (2021a); МЭА (2021a).

Примечание: Международное энергетическое агентство (International Energy Agency) ссылается на водород «на основе ископаемых видов топлива, с CCUS» (с улавливанием, утилизацией и хранением углерода) и водород «на основе электролиза». Совет по водороду (Hydrogen Council) прогнозирует, что 60-80% водорода будет производиться на основе возобновляемых источников энергии, а остальная часть будет представлена низкоуглеродным водородом, который определяется как «водород, производимый из невозобновляемых источников энергии с углеродными выбросами ниже заданного порога». В настоящее время производство водорода включает в себя водород, получаемый в виде побочного продукта других технологических процессов.







© Jay June 69 / Shutterstock.com



## 1.2 ГЕОПОЛИТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ЧИСТОГО ВОДОРОДА

Создание глобальных цепочек производства и сбыта чистого водорода приведёт к геэкономическим и геополитическим изменениям. Прежде всего, вырисовывается, что «зелёный» водород потенциально способен кардинально повлиять на сокращение выбросов и достижение климатической нейтральности без ущерба для экономического и социального развития.

Экономические ставки высоки. Рыночная оценка нынешнего годового объёма продаж водорода составляет примерно 174 млрд долл. США, что уже превышает ежегодный оборот сжиженного природного газа (СПГ).<sup>2</sup> Даже если использование водорода ограничится промышленными процессами и транспортом дальнего следования, его рыночный потенциал огромен. Один сталелитейный завод, использующий водород вместо ископаемого топлива для восстановления железа, ежегодно потреблял бы примерно 300 000 тонн водорода, производимых электролизёрами мощностью 5 гигаватт (ГВт) (Mission Possible Partnership, 2021). Глобальные мощности электролизёров сегодня составляют лишь чуть более 0,3 ГВт. Согласно данным крупнейших инвестиционных банков, к 2050 году мировые продажи водорода могут достичь 600 млрд долл. США (Financial Times, 2021), а производственно-сбытовые цепочки для «зелёного» водорода могут стать возможностью для инвестиций на сумму 11,7 трлн долл. США в течение следующих 30 лет;<sup>3</sup> охватив все сферы, связанные с производством и сбытом водорода — от специальных мощностей возобновляемой энергетики и электролизёров до транспортной инфраструктуры (Goldman Sachs, 2020).

Преобразующее влияние водорода выходит за рамки его расчётной рыночной стоимости. Лучше всего его можно описать как универсальный энергоноситель, который может стимулировать инновации во многих различных отраслях и сегментах. Его геополитическое влияние может повторить модели влияния паровой энергии, электроэнергии или двигателя внутреннего сгорания. Каждая из этих технологий по-своему трансформировала оборудование и топливо, благодаря которым функционирует значительная часть нашей современной цивилизации. В процессе своего развития они также влияли на различные аспекты человеческой жизни, изменяли модели мировой торговли и формировали расстановку сил в мире. Эти технологии принесли большую пользу человечеству, но эффект от них не распределился справедливым образом. В результате общество столкнулось с бременем новых внешних факторов и глобальных проблем.

По сравнению с этими определяющими эпоху технологиями влияние чистого водорода будет, вероятно, не таким значительным, но этот ресурс не стоит сбрасывать со счетов слишком быстро. За простой химической формулой газообразного водорода ( $H_2$ ) лежит целая система инфраструктуры для производства, транспортировки, преобразования и использования водорода. Такая система могла бы создать новые связи между ранее разделёнными энергетическими секторами электроэнергетики, тепловой энергетики и транспорта. Она могла бы стимулировать возникновение партнёрств, выходящих за традиционные

2 Объём международной торговли СПГ в 2019 г. составил 143 млрд долл. США (UN Comtrade, 2021).

3 Включает в себя возобновляемую электроэнергию, электростанции на водороде, электролизёры и реконфигурацию газопроводов.

отраслевые границы. Что ещё важнее, толчок к развитию сектора чистого водорода в качестве первостепенного энергоносителя, вероятно, коренным образом изменит нынешние энергетические производственно-сбытовые цепочки и создаст возможности для заметного участия на этом рынке большего количества стран. В конечном счёте, это даже может привести к совершенно новому географическому распределению производственной деятельности.

Геополитические аспекты чистого водорода, вероятно, будут проявляться поэтапно. Двадцатые годы двадцать первого века могут стать эпохой большой гонки за лидерство в сфере технологий по мере существенного сокращения издержек и быстрого масштабирования необходимой инфраструктуры. Во многих местах к 2030 году «зелёный» водород начнёт конкурировать с «синим» водородом по показателю издержек (IRENA, 2020a). Согласно многим сценариям декарбонизации, спрос начнёт расти с 2035 года (Мировой энергетический совет, 2021). В течение этого периода международная торговля водородом и его производными может значительно вырасти, хотя первоначальные торговые маршруты могут установиться и раньше (Ram et al., 2020).



### 1.3 ЦЕЛИ ДОКЛАДА

В этом докладе даётся комплексный анализ геополитических движущих факторов и потенциальных последствий развития производственно-сбытовых цепочек чистого водорода.

В основе этого доклада лежит концепция «потрясения». Мы являемся свидетелями преобразований во многих сферах экономики и общества — от энергетических систем, изменения климата, технологических траекторий, геополитических взаимоотношений до торговли и инвестиций. Ключевой вопрос данного доклада, сформулированный с учётом нестабильности политической, технической, экологической и экономической систем: как и насколько использование водорода усугубляет или смягчает такие потрясения, а также кто выиграет или, быть может, проиграет от таких изменений. Цель данного доклада — не только описать, как водород может изменить будущие энергетические системы, но и дать определённое представление о том, как страны и заинтересованные стороны могут подготовиться к положительным или отрицательным изменениям.

Возможный путь, по которому может развиваться сектор чистого водорода, всё ещё сопряжён с множеством неопределённостей. Поэтому данный доклад представляет собой лишь обзорный документ, носящий исследовательский характер. В качестве исходной базы для анализа используется сценарий Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (агентства IRENA) по ограничению глобального потепления 1,5 °C, описанный в «Прогнозе преобразования мировой энергетической системы» Агентства (WETO) (вставка 1.2) (IRENA, 2021a). Тем не менее в докладе подробно рассматриваются не только геополитические

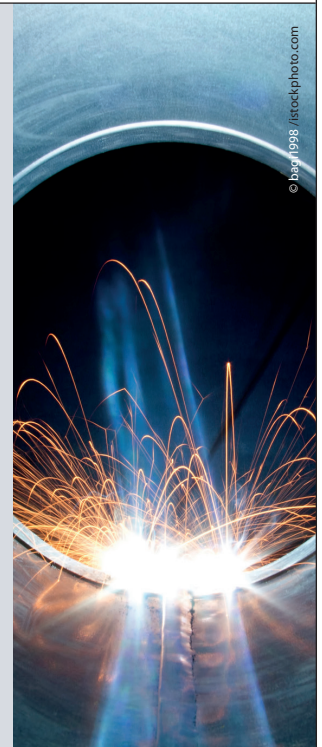
последствия определённого пути освоения водорода, но и способы, с помощью которых различные участники активно пытаются сформировать многочисленные потенциальные пути развития сектора водорода.

Данные для проведения анализа в этом докладе были получены с помощью двух исследований (вставка 2.2). В одном из них были опрошены члены агентства IRENA,<sup>4</sup> в другом — группа профильных экспертов. Доклад также опирается на более ранние обширные материалы агентства IRENA по исследованию вопроса водорода и сопутствующих тем с технических, экономических и политических позиций. В нём также использованы труды экспертов из разных стран мира, в том числе тех, кто участвует в проводимом агентством IRENA Рамочном совещании по геополитическим аспектам трансформации энергетики.

В этом докладе отражены многие основные темы, затронутые в представленном Глобальной комиссией отчёте за 2019 г. (IRENA, 2019a), включая, помимо прочего, лидерство в сфере технологий, энергетическую безопасность и изменение моделей торговли. В нём обозначены политические соображения для правительств и других участников с тем, чтобы помочь им смягчить геополитические риски и выгодно использовать имеющиеся возможности.

### **ВСТАВКА 1.2 ОСНОВНЫЕ ПРОГНОЗЫ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВОДОРОДА К 2050 Г. СОГЛАСНО СЦЕНАРИУ АГЕНТСТВА IRENA ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ 1,5 °С**

- На водород и его производные приходится 12% конечного энергопотребления и 10% сокращения выбросов углекислого газа (CO<sub>2</sub>). Они играют важную роль в трудно поддающихся декарбонизации, энергоёмких секторах, таких как сталелитейное производство, химическая промышленность, транспортные средства дальнего следования, судоходство и авиация. Кроме того, водород помогает балансировать предложение и спрос на возобновляемую электроэнергию и служит долгосрочным сезонным хранилищем.
- По сравнению с нынешней мощностью водородных электролизёров – всего лишь 0,3 ГВт – в будущем потребуются мощности порядка 5 000 ГВт.
- Спрос на электроэнергию для производства водорода достигает почти 21 000 тераватт-часов (ТВт-ч), что почти соответствует сегодняшнему уровню потребления электроэнергии.
- В 2050 г. на производство «зелёного» водорода и его производных будет приходиться 30% всего спроса на электроэнергию.
- По крайней мере две трети всего производимого водорода относятся к «зелёному» варианту, остальная часть — «синий» водород.



© Barry 1998 / iStockphoto.com

4 На момент проведения исследования (июль 2021 г.) в агентство IRENA входило 164 страны-члена и Европейский союз.

## ГЛАВА 2.

# РОЛЬ ВОДОРОДА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПЕРЕХОДЕ

## 2.1 ЧТО ТАКОЕ ВОДОРОД?

Водород — самый древний, самый лёгкий и самый распространённый элемент во вселенной. Он естественным образом присутствует во многих соединениях, в том числе в воде и ископаемых видах топлива.

Газообразный водород используется главным образом в (нефте) химической отрасли: для переработки сырой нефти, синтеза аммиака (в основном, для производства удобрений) и производства метанола, используемого для самых разных продуктов (включая пластмассы).

В мире производится около 120 млн тонн водорода, две трети которого представляют собой чистый водород, а одна треть — смесь с другими газами (МЭА, 2019а). Крупнейшим производителем и потребителем водорода является Китай (рисунок 2.1). Ежегодно он производит почти 24 миллиона тонн чистого водорода, что соответствует приблизительно одной трети специализированного глобального производства.

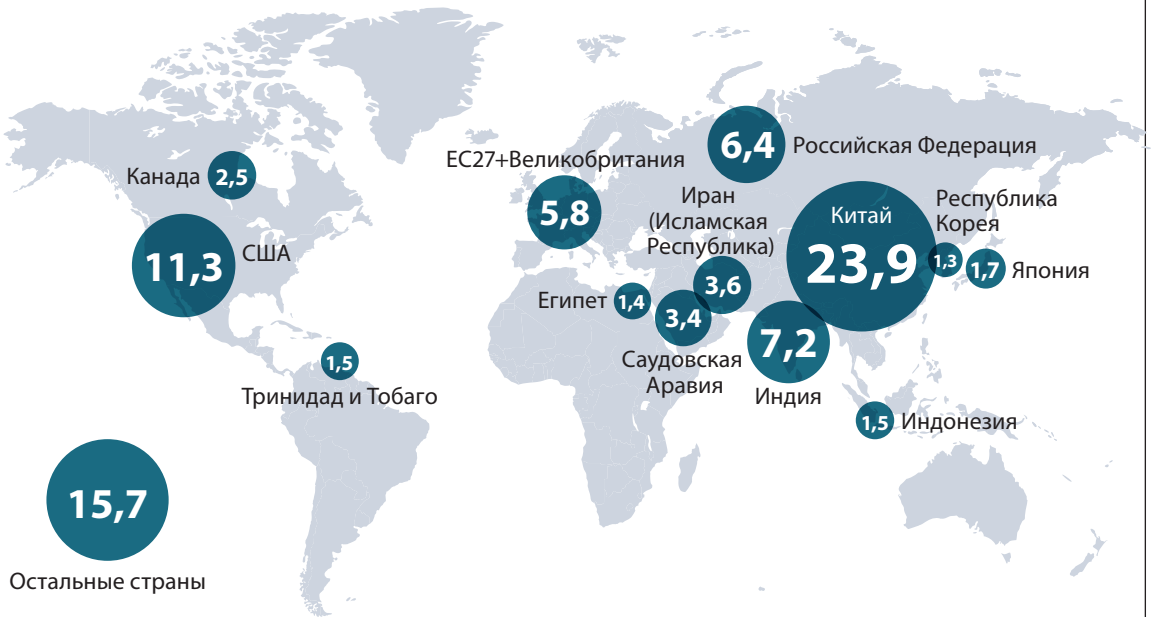
Водород также можно использовать в качестве топлива. При сгорании он может генерировать тепло с температурой более 1000 °C без выделения  $\text{CO}_2$ .<sup>5</sup> Кроме того, водород также можно использовать в топливных ячейках, где он вступает в химическую реакцию с кислородом, вырабатывая электричество без выделения каких-либо загрязняющих веществ или парниковых газов. Единственным побочным продуктом в этой химической реакции является водяной пар.

5 Хотя сжигание водорода не приводит к выбросам  $\text{CO}_2$ , оно является источником выбросов оксида азота — серьёзного загрязнителя воздуха.





**Рисунок 2.1** Потребление водорода в 2020 г. (миллионов тонн в год)



Источник карты: Natural Earth, 2021 г.

Примечание: показатели указаны исходя из текущего производства аммиака, метанола, переработки и прямого восстановления железа для стали.

Отказ от ответственности: данная карта приведена исключительно в целях наглядности. Показанные на карте границы и названия не подразумевают какую-либо поддержку или принятие их агентством IRENA.

## 2.2 ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА

Несмотря на свою распространённость на Земле чистый водород в природе встречается в ограниченных количествах. Под землёй нет больших залежей водорода, которые можно было бы добывать.<sup>6</sup> Водород находят почти исключительно в соединениях, особенно в молекулах воды (состоящих из водорода и кислорода) и ископаемых видах топлива (содержащих водород и углерод). Водород можно выделить из этих соединений, но для этого требуется энергия.

Для описания различных методов производства водорода обычно используется система цветовой кодировки (рисунок 2.2). Основная часть водорода сегодня представлена его «серым» вариантом, который производится с использованием ископаемых видов топлива, в частности, методом паровой конверсии метана из природного газа или путём газификации угля.<sup>7</sup> Эти основанные на ископаемых видах топлива способы производства, на которые сегодня приходится 95% поставляемого водорода, приводят к значительным выбросам CO<sub>2</sub> и несовместимы со стратегией перехода к нулевым выбросам.

**Рисунок 2.2** Выбранная типология производства водорода с цветовой кодировкой

	«СЕРЫЙ» ВОДОРОД	«СИНИЙ» ВОДОРОД	«ЗЕЛЁНЫЙ» ВОДОРОД
Процесс	Риформинг или газификация	Риформинг или газификация с улавливанием углерода	Электролиз
Источник энергии	Ископаемые виды топлива 	Ископаемые виды топлива 	Возобновляемая электроэнергия 
Расчётные выбросы от производственного процесса	Риформинг: 9-11b Газификация: 18-20	0,4-4,5с	0

Примечание: а) CO<sub>2-экв</sub>/кг = эквивалент углекислого газа на килограмм; б) для «серого» водорода, 2 кг CO<sub>2-экв</sub>/кг принято для утечки метана в ходе процесса паровой конверсии метана; с) для выбросов при производстве «синего» водорода предполагаемая степень улавливания углерода составляет от 98% до 68%, а доля утечки метана — от 0,2% до 1,5%.

6 В земной коре можно найти ряд пустот с газообразным водородом. Чистый газообразный водород, также известный как природный или «золотой» водород, в теории, может добываться таким же образом, как нефть и газ. Компании бурят скважины для добычи таких ресурсов в таких местах, как Франция, Мали и Соединённые Штаты Америки. Однако данный тип водорода остаётся уникальным геологическим феноменом и представляет собой невозобновляемый источник энергии (Prinzhofer, Cissé and Diallo, 2018; Zgonnik, 2020).

7 Иногда эта категория дополнительно подразделяется на «серый» тип — для природного газа, «коричневый» — для бурого угля, и «чёрный» — для каменного угля. Однако в данном докладе термин «серый водород» относится к водороду, производимому на основе ископаемых видов топлива в целом.



Для замены «серого» водорода рассматриваются два основных способа экологичного производства — «зелёный» и «синий» водород. Производство «зелёного» водорода полностью согласуется с программой «углеродной нейтральности». Оно опирается на давно известные технологии, основанные на электролизе воды (вставка 2.1) с подачей электричества от возобновляемых источников энергии. В настоящее время производство водорода из возобновляемых источников ограничено, но ситуация будет меняться по мере смещения глобального фокуса на потенциал этого элемента.

«Синий» водород производится из ископаемых видов топлива с улавливанием и хранением углерода (CCS). Дооборудование существующих объектов производства «серого» водорода с помощью технологии CCS позволило бы продолжать использовать эти активы и сократить выбросы парниковых газов. Однако производство «синего» водорода опирается на использование ископаемого природного газа, что несёт риски утечек метана при его добыче и транспортировке — гораздо более сильнодействующего парникового газа, чем  $\text{CO}_2$ . Таким образом, «синий» водород может обеспечить очень низкие выбросы парниковых газов, только если выбросы метана не превышают 0,2%<sup>8</sup> при почти 100-процентном улавливании углерода. Но такие показатели ещё только предстоит достичь при больших объёмах производства (Bauer *et al.*, 2021; Howarth and Jacobson, 2021; МЭА, 2021b; IRENA, 2020b; Sauniois *et al.*, 2016).

У «синего» водорода также есть другие особенности, ограничивавшие его широкое использование. Для его производства используются ископаемые виды топлива, что ставит его в зависимость от колебания цен, например, взлёта цен в конце 2021 г. во многих регионах мира, особенно в Азии и Европе (Collins, 2021a); это также не способствует целям стойкости к воздействию климата или энергетической безопасности. Кроме того, в этом случае возникают дополнительные издержки на транспортировку и хранение  $\text{CO}_2$ , а также требуется контроль хранения  $\text{CO}_2$ .

Однако если «синий» водород будет удовлетворять строгим критериям по выбросам, он сможет сыграть важную роль в масштабировании объёмов производства водорода в краткосрочной и среднесрочной перспективе, а также стимулировать развитие соответствующей инфраструктуры и технологий на всём протяжении производственно-сбытовой цепочки. Более того, «синий» водород может обеспечить дополнительную гибкость на рынке водорода. Однако в долгосрочной перспективе «зелёный» водород является решением, которое обеспечивает нулевые углеродные выбросы, и поэтому должен рассматриваться как конечная цель.

Существуют и другие пути достижения низкоуглеродных выбросов для производства водорода. Одним из вариантов является «бирюзовый» водород, получаемый путём пиролиза метана (природного газа) без выбросов  $\text{CO}_2$ . Единственным побочным продуктом данного процесса является твёрдое вещество «углеродная сажа», для которого имеется собственный рынок, хотя и относительно небольшой. Ещё один вариант — «розовый» водород, получаемый с помощью электроэнергии, выработанной с использованием ядерного топлива. Третий вариант — газификация биомассы с улавливанием и хранением углерода, что может обеспечить отрицательные выбросы  $\text{CO}_2$ . Ни один из этих типов водорода в данном докладе не рассматривается, так как приоритетное внимание направлено на более освоенные методы производства.



<sup>8</sup> Это предельное значение соответствует цели, заданной в рамках нефтегазовой климатической инициативы (Oil and Gas Climate Initiative) (Agora, 2021).

## ВСТАВКА 2.1 ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОЛИЗЁР?

Электролиз — это химический процесс, в результате которого из воды и электричества получают водород. Электролизёры — устройства, которые могут разделять воду на кислород и водород, — были изобретены более 200 лет назад.

Существуют различные технологии электролиза. Среди них выделяют четыре перспективных вида: щелочной электролиз, протонообменная мембрана (PEM), твёрдо-оксидные электролизные ячейки (SOEC) и анионообменная мембрана (AEM). Все установленные мощности электролизёров используют либо щелочную технологию, либо протонообменную мембрану. Электролизёры с AEM появились относительно недавно и используются в ограниченных масштабах. Их потенциальные преимущества заключаются в том, что они не используют ценные металлы, а их мембрана дешевле, чем PEM-мембрана.

**Таблица 2.1 Сравнение основных технологий электролизёров**

Тип	Коммерческий статус	Факторы для рассмотрения
<b>Щелочной</b>	Отработанная технология	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Простая конструкция системы.</li> <li>• Наличие других, пригодных к масштабированию применений с существующей цепочкой поставок.</li> <li>• Более медленное оперативное реагирование; меньше подходит для поддержки переменной возобновляемой энергии (VRE).</li> </ul>
<b>Протонообменная мембрана (PEM)</b>	Коммерческий статус, быстрый рост	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Требуются платина и иридий. Текущее мировое производство иридия может обеспечивать ввод в эксплуатацию 3-7,5 ГВт в год.</li> <li>• Более быстрое оперативное реагирование; хорошо подходит для VRE и регулирования напряжения.</li> </ul>
<b>Твёрдооксидные электролизные ячейки (SOEC)</b>	Демонстрационные промышленные установки	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Отсутствие цикличности (роста или спада); хорошо подходят для производства водорода в режиме постоянной «базовой нагрузки».</li> </ul>
<b>Анионообменная мембрана (AEM)</b>	Ограниченное использование	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ценные металлы не используются.</li> <li>• Более дешёвая мембрана по сравнению с PEM-мембраной.</li> </ul>

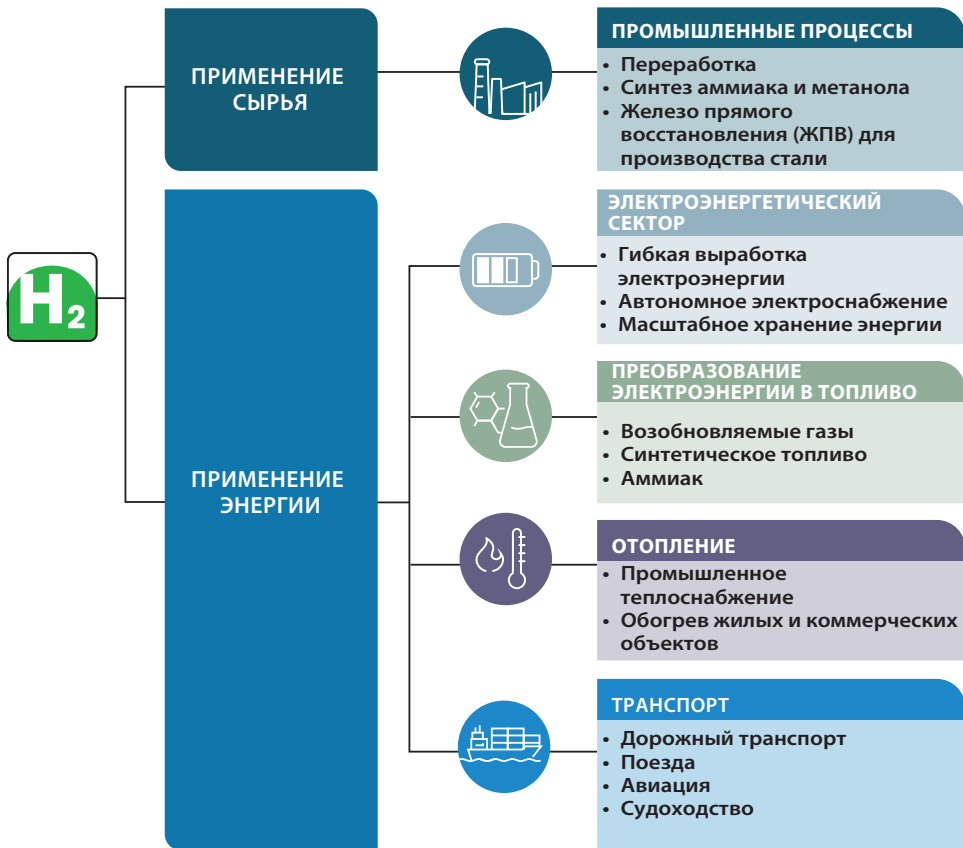
Источники: IRENA (2020a, 2020b).

## 2.3 ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА И РАССТАНОВКА ПРИОРИТЕТОВ

Водород — это универсальный энергоноситель, который можно использовать во многих сферах. На рисунке 2.3 показаны потенциальные сферы применения водорода, некоторые из которых могут обеспечить ранний спрос и помочь отрасли начать успешно развиваться.



**Рисунок 2.3** Потенциальные области применения чистого водорода

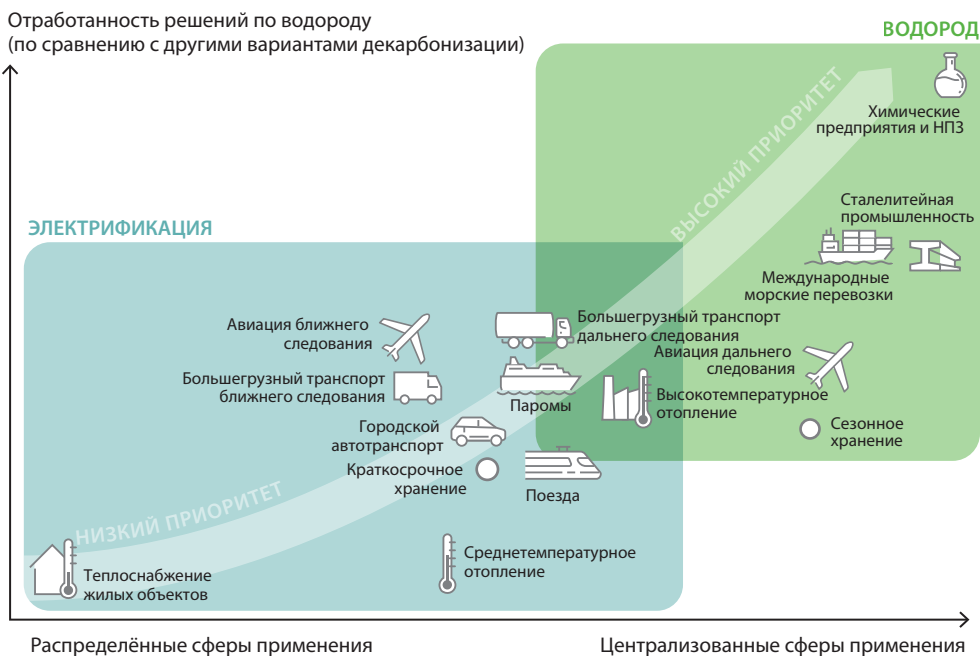


Источник: IRENA (2020b).

Стратегии декарбонизации требуют тщательного управления, чтобы обеспечить эффективное внедрение выбранных технологий и решений. Таким образом, ввиду широкого диапазона вариантов использования этого ресурса требуется определить области применения, в которых водород сможет принести максимальную пользу. Для его производства, транспортировки и преобразования требуется энергия, что приводит к повышению общего спроса на неё. Бессистемное использование данного ресурса может замедлить энергетический переход и снизить эффективность усилий по декарбонизации сектора производства электроэнергии. Следовательно, водород лучше всего использовать в тех сферах, где ему в настоящее время нет реальных альтернатив. На рисунке 2.4 приводится сравнение возможных вариантов конечного потребления на основе масштаба применения и отработанности решений по водороду с вариантами, основанными на электричестве. При разработке водородной политики следует уделять внимание более отработанным и централизованным решениям. Это могут быть целевые исследования, планирование и вспомогательные инструменты политики (IRENA, ещё не опубликовано-б).

Переход на действительно устойчивую экономику — это не просто замена энергоресурсов и сохранение нынешней энергосистемы. Требуется разработать более эффективные и справедливые способы использования энергии. Для этого следует сократить избыточное энергопотребление во многих конечных сферах использования и изменить современную экономическую систему, основанную на непрерывно растущем потреблении. Например, в тяжёлой промышленности можно сократить выбросы CO<sub>2</sub> на 40% за счёт более эффективного повторного использования стали, алюминия и пластмасс (Lovins, 2021a). Ещё одним примером может быть перенаправление, по возможности, пассажиропотока с самолётов ближнего следования на электропоезда с целью сокращения спроса.

**Рисунок 2.4** Приоритеты политики в сфере чистого водорода

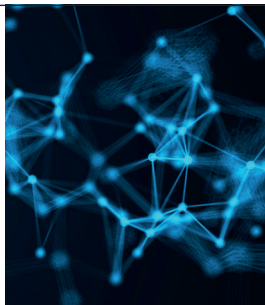


Источник: IRENA (ещё не опубликовано-б).

## 2.4 ПРЕПЯТСТВИЯ ДЛЯ РАСШИРЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА

В настоящее время следующие препятствия не позволяют более масштабно использовать чистый водород для преобразования энергетического сектора:

- **Стоимость:** стоимость чистого водорода, особенно «зелёного», всё ещё высока по сравнению с высокоуглеродными видами топлива. Высокой остаётся не только себестоимость производства, но и затраты на транспортировку, преобразование и хранение водорода. Внедрение технологий чистого водорода для конечного использования может быть сопряжено с высокими издержками, при этом технология CCS ещё не используется в больших масштабах.
- **Технологическая отработанность:** у некоторых необходимых для декарбонизации технологий в цепочке производства и сбыта водорода всё ещё низкий уровень технологической готовности, и они требуют отработки в необходимом масштабе. Например, газовые турбины, работающие исключительно на водороде, в настоящее время недоступны в готовом виде, а для морской торговли пока имеется лишь один прототип судна, способного транспортировать жидкий водород.
- **Эффективность:** на каждом этапе водородной производственно-сбытовой цепочки, включая производство, транспортировку, преобразование и использование, возникают существенные энергопотери. Кроме того, производство «синего» водорода является энергоёмким процессом, который повышает общий спрос на энергию.
- **Достаточная возобновляемая электроэнергия:** к 2050 году для производства водорода с помощью электролизёров может потребоваться почти 21 000 ТВт·ч — почти столько же электричества, сколько генерируется сегодня во всём мире (IRENA, 2021a). По мере электрификации всё большего числа секторов конечного потребления нехватка достаточного количества возобновляемой электроэнергии может оказаться «узким местом» для «зелёного» водорода.
- **Неопределённость политики и регулирования:** хотя более 140 стран взяли на себя обязательство достичь нулевых выбросов в течение ближайших десятилетий, темпы, при которых эта цель будет достигнута, остаются неопределёнными. Для поддержки масштабного развития и развёртывания требуются стабильные, долгосрочные нормативные базы.
- **Стандарты и сертификация:** в странах отсутствуют институционализированные механизмы для отслеживания производства и потребления любого типа водорода и определения его характеристик (происхождения и выбросов в течение жизненного цикла продукта) (IRENA, 2020b; IRENA, МЭА и REN21, 2020).<sup>9</sup> Более того, водород не учитывается в официальной статистике общего конечного энергопотребления, и не отражается экономическая ценность вклада чистого водорода в сокращение выбросов.
- **Проблема «курицы и яйца»:** в создании необходимой инфраструктуры для водорода существует проблема «курицы и яйца». Без достаточного спроса инвестиции в масштабное производство, благодаря которому себестоимость может снизиться, остаются слишком рискованными, но без экономии масштаба технология остаётся слишком дорогой.



© King Ropes Access/shutterstock.com

<sup>9</sup> Механизм отслеживания происхождения и выбросов в течение жизненного цикла продукта часто называется «Гарантией происхождения» (Guarantee of Origin). Она считается базовым элементом для разработки политики в области «зелёного» водорода (IRENA 2020b).

**Рисунок 2.5 Основные презюмируемые препятствия для разработки водородной политики и стратегий**

Источник: опрос членов агентства IRENA, 2021 г.

## ВСТАВКА 2.2

### ГЕОПОЛИТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВОДОРОДУ

Для изучения этой новой и быстро развивающейся темы, вызывающей широкий интерес, были проведены два добровольных опроса с целью получения комментариев отраслевых экспертов и лиц, ответственных за разработку политики, чтобы иметь основу для наблюдения за изменениями в секторе водорода.

Целью первого опроса был сбор исходных данных из разных стран для того, чтобы глубже понять их планы, а также сопутствующие стимулы и препятствия для использования водорода в энергетическом переходе. Этот опрос был выпущен для членов агентства IRENA, в котором на тот момент состояли 164 страны и ЕС. Всего было получено 48 ответов от 37 членов.

Второй опрос был направлен на профильных экспертов (целевая выборка), чтобы услышать их мнения о технической стороне вопроса. В рамках этого второго исследования было привлечено 162 эксперта и получено 78 ответов. Полученная информация была проанализирована и собрана воедино. Отдельные результаты анализа представлены в данном докладе. Все результаты опроса доступны в цифровом приложении.





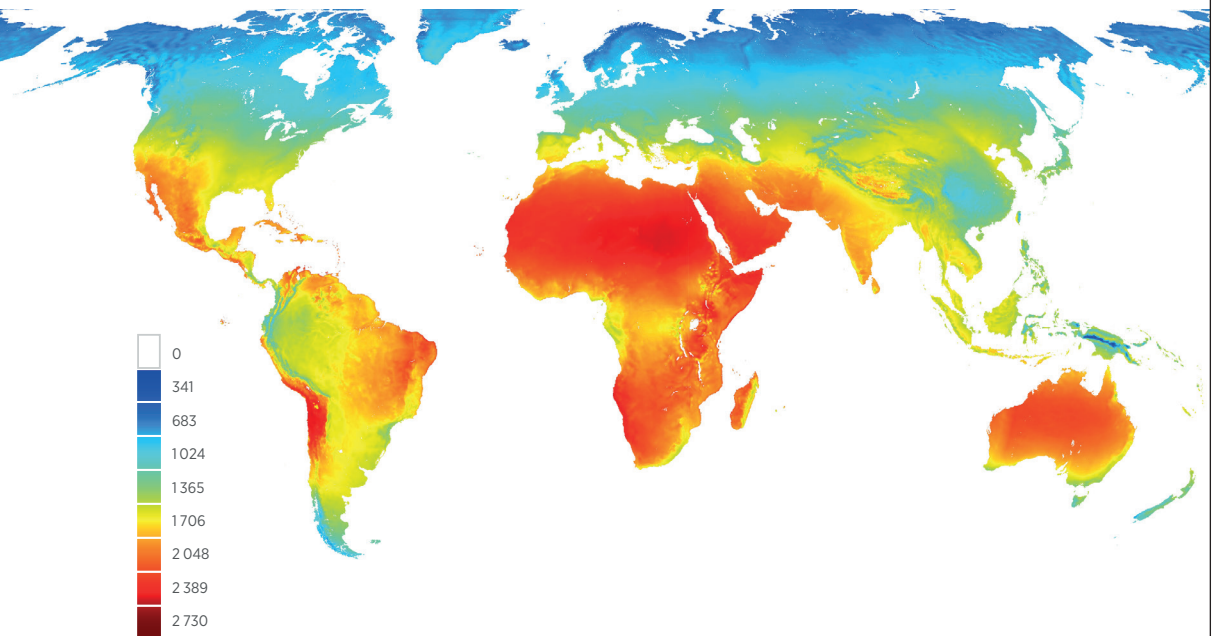
## 2.5 ПЕРСПЕКТИВЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ ТОРГОВЛИ ВОДОРОДОМ

На сегодняшний день водород остаётся крайне локализованным бизнесом. Около 85% газообразного водорода производится и потребляется на месте в пределах одного объекта, а не покупается и продаётся на более широком рынке (МЭА, 2019а). Даже продаваемый водород обычно не транспортируется на дальние расстояния из-за логистических трудностей и издержек.

Со временем водород мог бы стать международным биржевым товаром. «Зелёный» тип водорода обеспечивает дополнительные возможности для «транспортировки солнечного света», т.е. трансграничной транспортировки солнечной энергии и энергии из других возобновляемых источников. Самый существенный элемент себестоимости при производстве водорода — это затраты на электроэнергию (IRENA, 2020а). Поскольку полная приведённая стоимость возобновляемых источников энергии существенно варьируется в разных регионах, цена водорода также будет различаться.<sup>10</sup> Самое экономичное производство «зелёного» водорода возможно создать в тех регионах, где есть оптимальное сочетание богатых возобновляемых ресурсов (рисунок 2.6 и рисунок 2.7), наличия земли, доступа к водным ресурсам и возможности транспортировать и экспортировать энергию в крупные центры спроса.

<sup>10</sup> Различия по регионам в основном определяются i) качеством ресурса; ii) капитальными затратами (CAPEX) на возобновляемую энергию и электролизёры; iii) средневзвешенной стоимостью капитала (WACC). Со временем, по мере развёртывания новых мощностей и наработки опыта, два последних фактора будут меняться (IRENA, ещё не опубликовано-а).

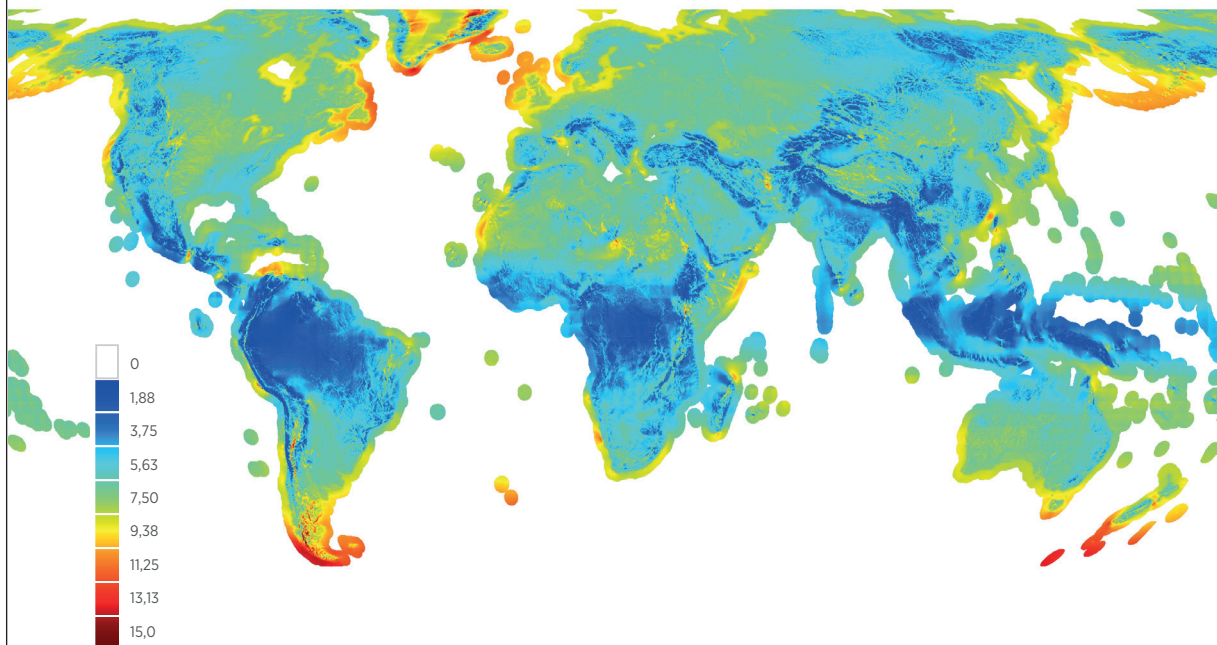
**Рисунок 2.6** Мировой технический потенциал солнечной энергии



© IRENA (2022), Источник: Vortex (2021)

Примечание: среднегодовая глобальная горизонтальная радиация (кВт-ч/м²). Информация также доступна в Мировом атласе IRENA для веб-платформы Renewable Energy.

Отказ от ответственности: данная карта приведена исключительно в целях наглядности. Показанные на карте границы не подразумевают какую-либо поддержку или принятие их агентством IRENA.

**Рисунок 2.7** Мировой технический потенциал ветровой энергии

© IRENA (2022), Источник: Vortex (2021)

Примечание: среднегодовая скорость ветра (м/с) на высоте 100 м. Информация также доступна в Мировом атласе IRENA для веб-платформы Renewable Energy.

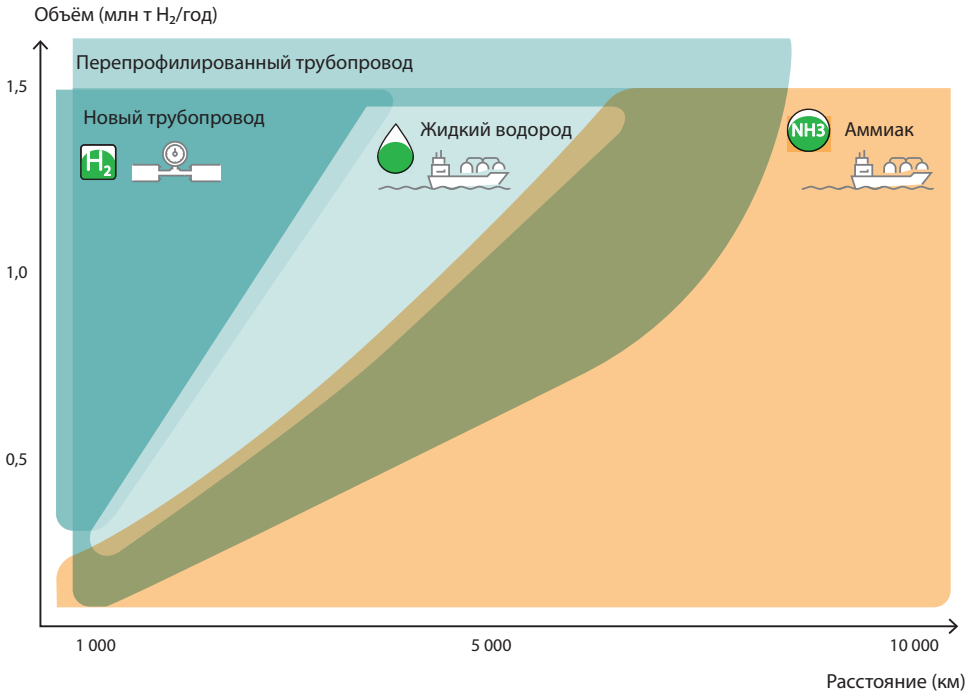
Отказ от ответственности: данная карта приведена исключительно в целях наглядности. Показанные на карте границы не подразумевают какую-либо поддержку или принятие их агентством IRENA.

Существует два основных способа транспортировки водорода в другие страны: по трубопроводам и морем.<sup>11</sup> Самый экономичный способ определяется в зависимости от расстояния и поставляемых объемов (рисунок 2.8). Так, при малых объемах (0,3 миллиона тонн водорода в год) трубопроводы были бы дешевле, чем доставка морем на расстояния менее 1 500 км. Для больших объемов (1,5 миллиона тонн водорода в год), новые водородные трубопроводы были бы самым экономичным вариантом при транспортировке на расстояния до 4 000 км. В тех случаях, когда возможно использование перепрофилированных газопроводов,<sup>12</sup> выгодные с точки зрения издержек расстояния увеличиваются до 8 000 км. Для наглядности: между Виндхуком (Намибия) и Йоханнесбургом (ЮАР) потребовалось бы проложить трубопровод длиной около 1 500 км. Для соединения Торонто (Канада) с Мехико (Мексика) потребовалось бы трубопровод длиной примерно 4 000 км. Для транспортировки водорода из Чили в Японию потребовалось бы преодолеть 17 000 км.

11 Теоретически также возможна перевозка грузовым транспортом. Однако такой транспорт подходит только для небольших объемов — например, для снабжения водородом заправочных станций. На практике для транспортировки крупных объемов на большие расстояния используются трубопроводы и танкеры.

12 Существующая газовая сеть из материалов, совместимых с водородом, и в условиях сокращения спроса на газ, позволяющего одновременно наращивать темпы внедрения водорода. Перепрофилированные трубопроводы могут обойтись на 65-94% дешевле новых трубопроводов.

**Рисунок 2.8** Рентабельность разных вариантов транспортировки с учётом объёмов и расстояний



Источник: IRENA (ещё не опубликовано-а)

Примечание: H<sub>2</sub> = газообразный водород; км = километр. МтH<sub>2</sub>/г = миллион тонн водорода в год.



В северо-западной части Европы, Российской Федерации (России) и Соединённых Штатах Америки (США) проложено около 4 600 км специальных магистральных трубопроводов для водорода. Также разрабатываются планы строительства системы магистральных трубопроводов в Европе под названием «Hydrogen Backbone» (Gas for Climate, 2021a). Кроме того, можно просто передавать возобновляемую электроэнергию по кабелям и на конце линии преобразовывать её в водород. Будь то трубопровод или кабель — оптимальное решение зависит от ряда факторов, включая желаемый конечный продукт, топографию местности и расстояние.

Транспортировка водорода морским путём технически возможна для более дальних расстояний, когда трубопроводы неприменимы. Вследствие низкой плотности энергии по объёму<sup>13</sup> газообразный водород до его погрузки на судно лучше всего преобразовать в жидкость с большей плотностью энергии. Транспортировка водорода морем возможна несколькими способами (вставка 2.3), но самым перспективным является аммиак. Он уже является международным биржевым товаром, с продажами в 2020 году на уровне 18 миллионов тонн (около 10% мирового производства) (Atchison, 2021).

13 3 киловатт-часа на кубический метр (кВт-ч/м<sup>3</sup>) по сравнению с 10 кВт-ч/м<sup>3</sup> для метана в нормальных условиях.

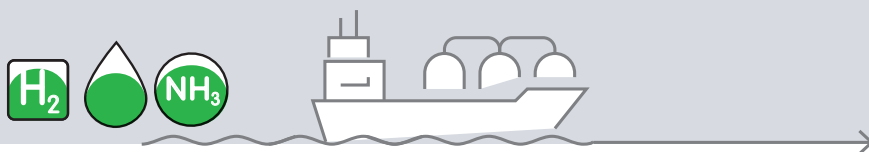
### ВСТАВКА 2.3

#### ТРИ ОСНОВНЫХ СПОСОБА МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДА

**Жидкий водород.** До погрузки на высокоизолированные танкеры молекулы водорода охлаждаются до  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  в портовых терминалах. В результате в ходе процесса сжижения потребляется 25-35% первоначального количества водорода. В настоящее время транспортировать чистый водород может только одно судно неограниченного морского плавания — Suiso Frontier, которое было построено компанией Kawasaki в конце 2019 г. и совершило своё первое плавание в Австралию в конце 2021 г. (Harding, 2019).

**Жидкие органические носители водорода (ЛОНС).** Ряд различных органических соединений может поглощать и выделять водород в процессе химической реакции. ЛОНС могут служить инструментом для хранения и транспортировки водорода и могут перевозиться в виде жидкостей без охлаждения. ЛОНС очень похожи на сырую нефть и нефтепродукты, поэтому имеющаяся инфраструктура для транспортировки нефти даже может быть приспособлена для перевозки ЛОНС (Niermann *et al.*, 2019).

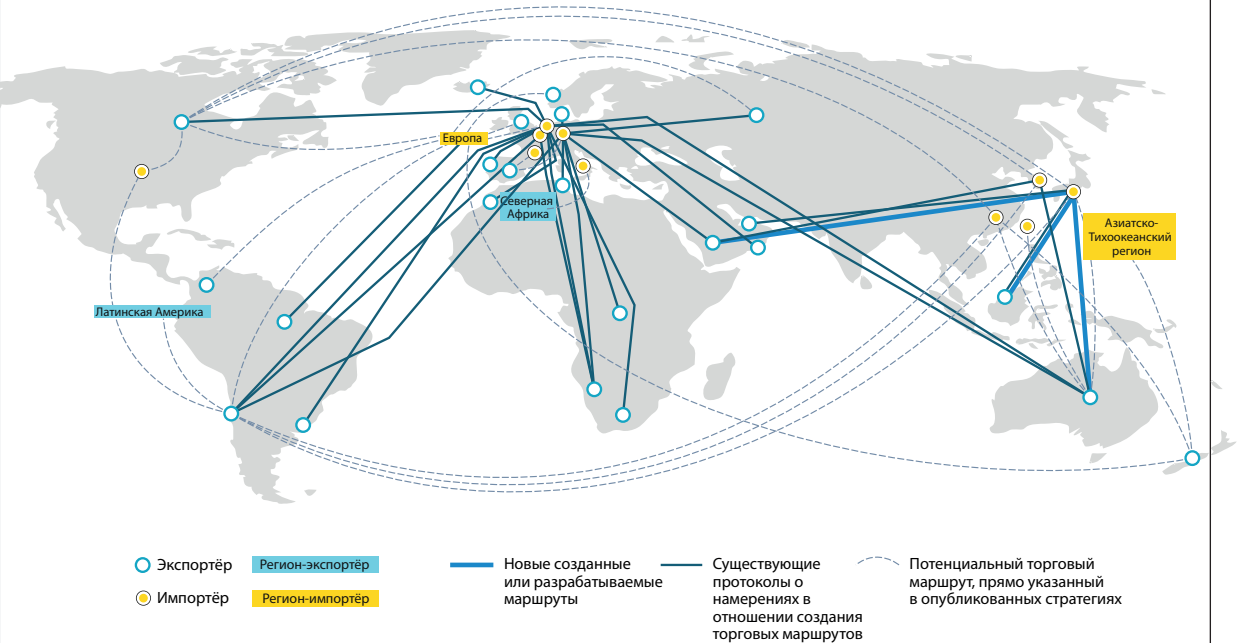
**Аммиак.** Водород можно превратить в аммиак в процессе реакции с азотом из воздуха, используя лишь электричество, воду и воздух. Аммиак имеет гораздо большую плотность энергии, чем водород, что означает возможность торговать большими объёмами энергии. В этом случае можно эффективно использовать хорошо налаженную международную торговлю аммиаком. Сейчас этот продукт используется в качестве сырья, в первую очередь для производства удобрений. Также аммиак можно использовать как топливо для декарбонизации, например, в транспортной отрасли и производстве электроэнергии. Недостаток аммиака заключается в том, что в случае утечек он представляет собой токсичное вещество, а также может быть источником выбросов оксида азота.



Затраты на транспортировку водорода всё ещё очень высоки, но они будут снижаться благодаря экономии масштаба, уменьшению проектных рисков и совершенствованию технологии. Торговлю «синим» водородом можно масштабировать более быстрыми темпами по сравнению с «зелёным» водородом, так как на сегодняшний день себестоимость производства «синего» варианта ниже и для него можно использовать существующую газовую инфраструктуру. Ожидается, что торговля «зелёным» водородом вырастет к 2030 году благодаря лучшей экономии масштаба и принятию стимулирующих инструментов политики, что снизит производственные затраты.

Опираясь на свой анализ, IRENA предполагает, что к 2050 году около одной трети «зелёного» водорода станет предметом международной торговли (IRENA, ещё не опубликовано-а). Эта доля немного выше сегодняшней доли природного газа, продаваемого на мировых рынках (24%). В 2050 году примерно половина продаваемого водорода, вероятно, будет транспортироваться по трубопроводам, в том числе переоборудованным трубопроводам природного газа, которые имеются уже сегодня. Вторая половина будет перевозиться в виде аммиака судами дальнего следования. Эта ситуация сравнима с торговлей природным газом, которая подразделяется на региональную торговлю по трубопроводам (48% в 2020 году) и международную торговлю СПГ (52%) (BP, 2021). Страны уже заключают двусторонние сделки, которые могут проложить путь для новых торговых отношений в сегменте водорода (рисунок 2.9).

**Рисунок 2.9** Расширяющаяся сеть маршрутов, планов и соглашений по торговле водородом



Источник карты: Natural Earth, 2021 г.

Примечание: информация на этом рисунке основана на данных, содержащихся в правительственных документах на момент написания.

Отказ от ответственности: данная карта приведена исключительно в целях наглядности. Показанные на карте границы и названия не подразумевают какую-либо поддержку или принятие их агентством IRENA.



**ГЛАВА 3.**

# ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОПОЛИТИЧЕСКОЙ КАРТЫ

Водород может изменить глобальное соотношение сил и привести к изменениям в относительной расстановке стран и регионов в международной системе. В данной главе рассматриваются ведущие игроки с точки зрения политики, будущие экспортёры водорода и лидеры в сфере новых технологий. Здесь также обсуждается положение стран-производителей ископаемых видов топлива, которые могли бы использовать водород для смягчения рисков, связанных с энергетическим переходом мира к углеродно-нейтральной экономике. В данной главе также описывается, как водород может стимулировать передислокацию энергоёмких отраслей в места, изобилующие возобновляемыми источниками энергии, которые могли бы стать центрами «зелёной» индустриализации.



© Imaginima / iStockphoto.com

03



### 3.1 ЛИДЕРЫ В ОБЛАСТИ ПОЛИТИКИ И ВЕДУЩИЕ РЫНКИ

Всё больше стран и компаний вовлекаются в жёсткую конкуренцию за лидерство в сфере технологий для чистого водорода. В данном разделе рассматриваются три показателя, с помощью которых можно определить лидеров в области политики и потенциальные ведущие рынки: национальные водородные стратегии, инвестиции и проекты на местах.

В 2017 г. только у одной страны (Японии) была национальная стратегия по водороду. Сегодня более 30 стран разработали или разрабатывают свои водородные стратегии (рисунок 3.1), что свидетельствует о растущем интересе к созданию производственно-сбытовых цепочек для чистого водорода.

**Рисунок 3.1** Готовые и разрабатываемые водородные стратегии, октябрь 2021 г.



Источник: Bloomberg (2021b) и WEC (2021). Источник карты: Natural Earth, 2021 г.

Отказ от ответственности: данная карта приведена исключительно в целях наглядности. Показанные на карте границы и названия не подразумевают какую-либо поддержку или принятие их агентством IRENA.

Охват и особенности таких стратегий значительно различаются. Во вставке 3.1 представлены стратегические концепции и приоритеты отдельных стран и регионов, которые могут стать первыми лидирующими рынками для водорода благодаря размеру своего рынка и (или) амбициозным планам в области водорода. У этих крупных рынков есть все предпосылки для установления стандартов и других правил игры, если их стратегии и планы будут реализованы.

### ВСТАВКА 3.1

#### РАННИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛИ? ПЕРСПЕКТИВЫ ВОДОРОДА В ОТДЕЛЬНЫХ ЛИДИРУЮЩИХ СТРАНАХ И РЕГИОНАХ

**КИТАЙ:** ежегодно потребляя более 24 миллионов тонн водорода, Китай является самым крупным пользователем и производителем этого ресурса. На производство водорода, в основном на основе угля, приходится 3-5% всего потребляемого Китаем угля.<sup>14</sup> С 2019 г. Китай реализует более 30 проектов в сфере «зелёного» водорода. В первой водородной программе Китая, выпущенной в 2016 г., основное внимание было направлено на применение водорода на транспорте (Стратегический консультационный комитет по технологической дорожной карте и Общество автомобильных инженеров (Strategy Advisory Committee of the Technology Roadmap and SAE), Китай, 2016). В Китае эксплуатируется примерно 8 400 транспортных средств на топливных элементах (ТСТЭ) — это третий по величине парк ТСТЭ в мире (после Республики Корея и Соединённых Штатов Америки). Кроме того, Китай — мировой лидер по количеству грузовых автомобилей и автобусов на топливных элементах (МЭА, 2021с). В нынешнем пятилетнем плане Китая (2021-2025 гг.) водороду отводится роль одной из шести ведущих отраслей будущего (CSET, 2021). Хотя у этой страны ещё нет национальной водородной стратегии, 16 провинций и городов уже разработали пятилетние планы, в которых фигурирует этот ресурс.

**ЕВРОПЕЙСКИЙ СОЮЗ:** Европейский союз (ЕС) выпустил собственную водородную стратегию в июле 2020 г. В ней водород определяется как ключевой элемент для достижения целей «Зелёного пакта для Европы». Стратегия фокусируется на возобновляемом водороде. Она предусматривает ввод в эксплуатацию в Европейском союзе 40 гигаватт электролизёров, работающих на возобновляемом водороде, к 2030 г. (Европейская комиссия, 2020а). Европейский союз стремится стать промышленным лидером в сфере чистого водорода. Для достижения этой цели он создал Альянс чистого водорода (Clean Hydrogen Alliance). Некоторые европейские страны рассчитывают стать крупными импортёрами водорода, а другие — экспортёрами или транзитными узлами.

**ИНДИЯ:** Индия объявила о запуске «Национальной водородной миссии» (National Hydrogen Mission) в августе 2021 г., поставив амбициозную цель стать «мировым хабом производства и экспорта «зелёного» водорода». Премьер-министр Нарендра Моди считает «зелёный» водород жизненно важным элементом, необходимым для «радикального прорыва» в направлении достижения энергетической независимости страны к 2047 г. (Recharge News, 2021а). Правительство рассматривает возможность обязать НПЗ и предприятия по производству удобрений использовать определённую долю «зелёного» водорода. Индия является крупнейшим импортёром аммиака в мире — основного сырья для производства удобрений: объём его импорта в 2019 г. составил 1,27 млрд долл. США (UN Comtrade, 2021).

14 Цифра 3% была рассчитана следующим образом: Китай производит 24 миллиона тонн водорода, 62% из которых получают с использованием угля. Для изготовления 1 килограмма (кг) водорода требуется около 8 кг угля. Таким образом, общее потребление угля для производства водорода составляет 119,04 миллионов тонн, что соответствует 3% всего потребляемого угля (3,8 млрд тонн) в 2019 г. Цифра 5% взята из источника Brasington (2019).



**ЯПОНИЯ:** Япония стала первой страной, принявшей национальную водородную стратегию в 2017 г. Она намерена стать первым в мире «водородным обществом» путём широкого использования водорода во всех секторах экономики (Министерство экономики, торговли и промышленности, 2017). Этот план опирается на значительные государственные инвестиции в водородные технологии и инфраструктуру. В 2020 г. около 670 млн долл. США было инвестировано в компании в сфере водорода и топливных элементов (Министерство окружающей среды Японии, 2020), а для транспортной отрасли поставлена цель: 800 000 единиц ТСТЭ и 900 водородных заправочных станций к 2030 г. (Центр стратегических и международных исследований, 2021). Страна разрабатывает долгосрочные соглашения о поставках водорода по примеру тех, благодаря которым была инициирована торговля сжиженным природным газом (Министерство экономики, торговли и промышленности, 2017).

**РЕСПУБЛИКА КОРЕЯ:** в водородной дорожной карте, опубликованной Республикой Корея в 2019 г., водород определялся как инструмент экономического роста и создания рабочих мест. Страна стремится стать мировым лидером в производстве и эксплуатации ТСТЭ, а также крупномасштабных стационарных топливных элементов для выработки электроэнергии (Центр стратегических и международных исследований, 2021). К 2020 г. здесь использовалось около 10 000 пассажирских ТСТЭ — больше, чем в какой-либо другой стране (E4Tech, 2021). Правительство планирует к 2025 г. довести этот показатель до 200 000 в рамках «Нового зелёного курса» (Министерство экономики и финансов, 2020). Оно также планирует использовать водород для электроснабжения 10% больших и малых городов страны и уездов к 2030 г. и 30% — к 2040 г. (Korea Herald, 2019). Правительство ожидает, что в 2050 г. водород станет крупнейшим энергоносителем в стране и на него будет приходиться третья часть всего энергопотребления (Recharge News, 2021b), а также исследует возможности импорта водорода из различных стран, включая Австралию и Саудовскую Аравию.

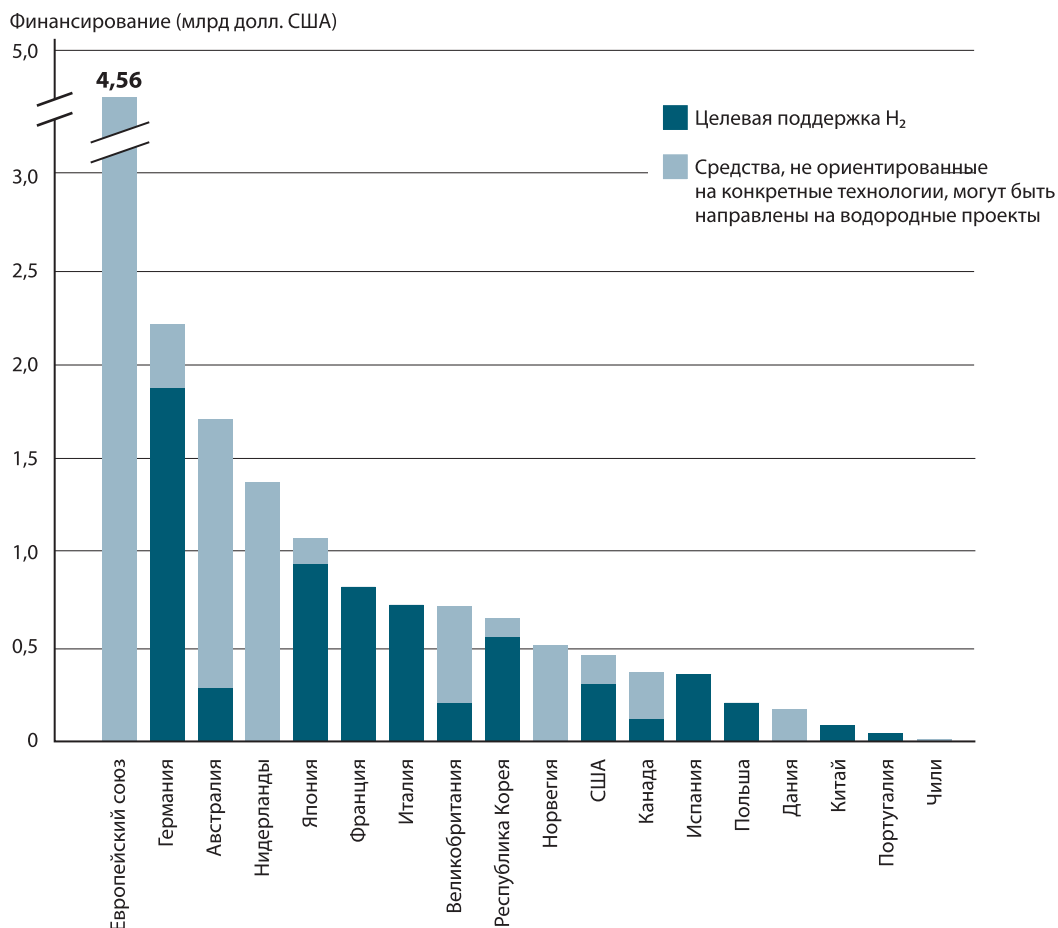
**СОЕДИНЁННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ:** Соединённые Штаты Америки — второй по величине потребитель и производитель водорода в мире. На США приходится 13% глобального спроса. До 2020 г. это был крупнейший в мире рынок ТСТЭ, на котором лидировал штат Калифорния, поддерживавший этот сектор почти десять лет с помощью Программы компенсаций при приобретении экологически чистого транспорта (Clean Vehicle Rebate Program). В ноябре 2021 г. Соединённые Штаты Америки приняли Закон о рабочих местах и инвестициях в инфраструктуру. Закон предусматривает выделение 9,5 млрд долл. США на ускоренное развитие технологии чистого водорода. Кроме того, Соединённые Штаты Америки запустили инициативу Hydrogen EarthShot, направленную на содействие разработке проектов по чистому водороду. Эта инициатива ставит амбициозную «цель 111»: снизить стоимость чистого водорода до 1 долл. США за 1 килограмм за 1 десятилетие.



Пандемия COVID-19 подстегнула конкуренцию за лидерство в сфере чистого водорода, так как многие страны признали важность этого ресурса для решения двух задач: смягчения последствий изменения климата и восстановления экономики после COVID-19. Значительная доля средств стран, направленных на экономическое стимулирование, была предназначена для водородных проектов, благодаря чему водород стал элементом геоэкономической конкуренции.

К началу августа 2021 г. правительства разных стран выделили по меньшей мере 65 млрд долл. США на целевую поддержку чистого водорода в течение последующего десятилетия, при этом Франция, Германия и Япония взяли на себя самые большие обязательства в этой сфере (рисунок 3.2). Эти суммы впечатляют, но они меркнут по сравнению с субсидиями в энергетическом секторе, которые в 2017 г. достигли 634 млрд долл. США, при этом 70% из них были направлены на поддержку ископаемых видов топлива (IRENA 2020c).

**Рисунок 3.2** Потенциально доступное среднегодовое финансирование водородных проектов, 2021-2030 гг.

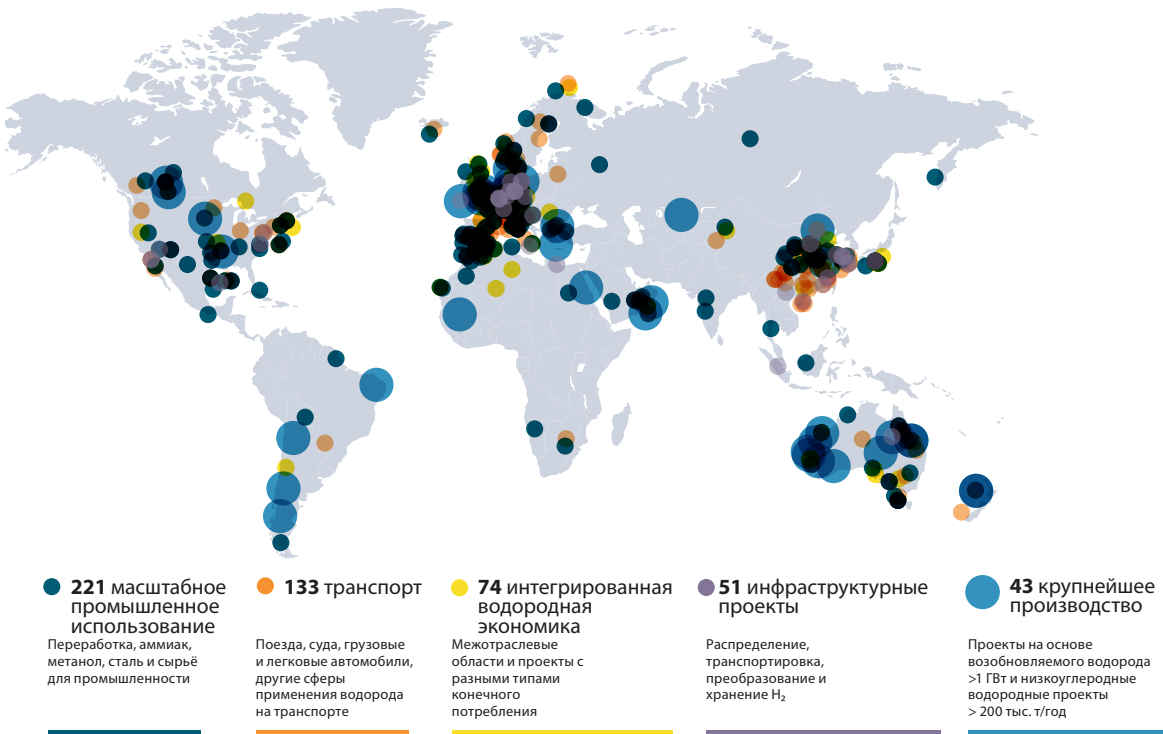


Источник: BloombergNEF (2021b).

Примечание: рисунок отражает общую картину поддержки, оказываемой водородной отрасли в отдельных странах на 5 августа 2021 г. Он не показывает механизмы поддержки, которые были объявлены или обсуждаются после этой даты, например, налоговые льготы в отношении производства водорода, предложенные Соединёнными Штатами Америки (Конгресс США, 2021).

На фоне этих национальных планов и программ поддержки в последние годы резко выросли инвестиции в чистый водород (рисунок 3.3). На ноябрь 2021 г., водородные проекты, заявленные в разных странах на период до 2030 г., составляют инвестиции на сумму до 160 млрд долл. США; при этом половина из них планируется для производства «зелёного» водорода с использованием возобновляемых источников энергии и электролиза (Совет по водороду, 2021).

**Рисунок 3.3** Проекты и инвестиции в чистый водород, по состоянию на ноябрь 2021 г.



Источник: Совет по водороду (2021). Источник карты: Natural Earth, 2021 г.

Примечание: рисунок отражает только крупномасштабные проекты, включая ввод объектов в эксплуатацию после 2030 г. Он не включает более 1 000 мелких реализуемых и предлагаемых проектов. GW = гигавайт;  $H_2$  = водород; тыс. т/год = тысяч тонн в год.

Отказ от ответственности: данная карта приведена исключительно в целях наглядности. Показанные на карте границы не подразумевают какую-либо поддержку или принятие их агентством IRENA.

К октябрю 2021 г. портфель объявленных проектов с использованием электролизёров достиг глобальной мощности 260 ГВт, и в случае реализации он позволит к 2030 г. ввести в эксплуатацию дополнительные ветряные и солнечные установки общей мощностью 475 ГВт (МЭА 2021d).<sup>15</sup> Хотя это и значительное увеличение по сравнению с 0,3 ГВт, установленными в 2020 г., ещё далеко до 160 ГВт, которые в среднем должны вводиться *каждый год* до 2050 г. включительно, чтобы достичь цели по ограничению роста температуры 1,5°C (IRENA, 2021a).

Благодаря почти половине от всех объявленных в мире масштабных проектов, измеряемых в мегаваттах, Европа вырывается вперёд, стимулируемая, в основном, мощным импульсом амбициозной политики декарбонизации, государственными стратегиями и поддержкой правительств. За Европой следуют Азия (23% объявленных проектов) и Северная Америка (13%). Прогнозируется, что самые большие объёмы чистого водорода будут производиться в Европе и Океании, на которые придётся более половины совокупной мощности (в основном из возобновляемых источников) в период до 2030 г. включительно. Также были объявлены супермасштабные проекты, измеряемые в гигаваттах и нацеленные на экспорт водорода, в Африке, Латинской Америке, Океании и на Ближнем Востоке (вставка 3.2).

15 Некоторые проекты, включённые в показатель 260 ГВт, находятся лишь на этапе разработки концепции.

### ВСТАВКА 3.2 ВОДОРОДНЫЕ ПРОЕКТЫ В АФРИКЕ

Огромный потенциал Африки в сфере возобновляемых источников энергии, а также её опыт работы с электролизёрами предыдущего поколения с начала 20-го века привлекли внимание международных инвесторов, которые объявили о запуске нескольких проектов в области «зелёного» водорода.

**ЕГИПЕТ** и **ЗИМБАБВЕ** уже ввели в эксплуатацию электролизёры общей мощностью более 100 мегаватт (МВт). В декабре 2021 г. Египет объявил о новом проекте на 100 МВт по производству «зелёного» аммиака.

В мае 2021 г. CWP Global, компания, специализирующаяся на разработке возобновляемых ресурсов, подписала протокол о намерениях с правительством **МАВРИТАНИИ** с целью реализации проекта по запуску электролизёров общей мощностью 16 гигаватт (ГВт) и установок на основе возобновляемых источников энергии мощностью 45 ГВт. Согласно расчётам, общая стоимость проекта составит 40 млрд долл. США (Energy Voice, 2021). Кроме того, Мавритания предоставила исключительные права компании Chariot (нефтегазовой компании, работающей в Бразилии, Марокко и Намибии) на разработку морских и наземных ветровых энергоустановок мощностью до 10 ГВт для производства «зелёного» водорода — проекта, способного дать старт строительству первой морской ветроэлектростанции в Африке (Recharge News, 2021c).

На конференции COP26 правительство **НАМИБИИ** объявило о выборе компании HYPHEN Hydrogen Energy в качестве победителя тендера для реализации проекта в сфере «зелёного» водорода. На первом этапе проекта планируется ввести в строй 2 ГВт мощностей по выработке электроэнергии из возобновляемых источников, а также электролизёры для производства «зелёного» водорода и для его дальнейшего превращения в аммиак. Дальнейшие этапы расширения в конце 2020-х годов могли бы довести общую инвестиционную стоимость этого проекта до 9,4 млрд долл. США, что почти соответствует нынешнему ВВП Намибии. После завершения интегрированное производство будет включать 5 ГВт генерирующих мощностей на возобновляемых источниках и 3 ГВт мощностей электролизёров, при этом избыточная электрическая мощность будет направлена в электросеть Намибии и потенциально в региональный электроэнергетический пул. При реализации проекта будет использоваться опреснённая вода, часть которой будет подаваться в общины, проживающие вблизи Людерица (Engineering News, 2021).





### 3.2 НОВЫЙ КЛАСС ЭКСПОРТЁРОВ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Страны и регионы с высоким потенциалом возобновляемых источников энергии и низкой средневзвешенной стоимостью электрической энергии могут использовать свои ресурсы, чтобы стать крупнейшими производителями «зелёного» водорода. Возможности разных регионов по производству больших объёмов недорогого «зелёного» водорода сильно различаются. Африка, Северная и Южная Америка, Ближний Восток и Океания — регионы с самым высоким техническим потенциалом; у Европы, Северо-Восточной Азии и Юго-Восточной Азии меньше ресурсов для производства «зелёного» водорода (рисунок 3.4). Технический потенциал возобновляемых источников стран – не единственный фактор, определяющий вероятность их превращения в крупных производителей «зелёного» водорода. На это также влияют многие другие факторы, в том числе существующая инфраструктура и «мягкие» факторы (поддержка правительства, деловая привлекательность, политическая стабильность), а также нынешний энергетический баланс и промышленность (планы по возобновляемым источникам энергии, потенциальный спрос на водород).



**Рисунок 3.4 Технические возможности для производства «зелёного» водорода по цене ниже 1,5 долл. США/кг к 2050 г., в ЭДж**



Источник: IRENA (ещё не опубликовано-а) Источник карты: Natural Earth, 2021 г.

Примечание: предполагаемые капитальные затраты (CAPEX) на 2050 г.: фотоэлектрическая энергия: 225-455 долл. США/кВт; наземная ветровая энергия: 700-1 070 долл. США/кВт; морская ветровая энергия: 1 275-1 745 долл. США/кВт. Средневзвешенная стоимость капитала: для показателей 2020 г. без технологических рисков по регионам. Технический потенциал рассчитан на основе наличия земли, с учётом ряда охранных зон (охраняемые зоны, леса, постоянно заболоченные участки, сельскохозяйственные поля, городские территории, склоны с углом наклона 5% [для фотоэлектрических установок] и 20% [для наземных ветровых установок], густонаселённые районы). Наличие водных ресурсов в анализе не учитывалось. ЭДж = эксаджоуль; кВт = киловатт.

Отказ от ответственности: данная карта приведена исключительно в целях наглядности. Показанные на карте границы и названия не подразумевают какую-либо поддержку или принятие их агентством IRENA.

Один из способов определения будущих импортёров и экспортёров «зелёного» водорода — сравнить потенциал внутреннего производства стран с их ожидаемым спросом на водород к 2050 г. и стоимостью импорта.<sup>16</sup> Таким образом можно выделить три группы стран. К первой группе относятся страны с низкокзатратным производством «зелёного» водорода, которые могут стать экспортёрами. Такие страны могут эффективно использовать свои рынки возобновляемых источников энергии для привлечения инвестиций в производство «зелёного» водорода. Среди таких чистых экспортёров водорода — Австралия, Чили, Марокко и Испания. Во вторую группу входят страны, которые могут стать самодостаточными в отношении «зелёного» водорода. У этих стран достаточный производственный потенциал для удовлетворения собственных нужд, без потребности в импорте. К ним относятся Китай и Соединённые Штаты Америки. В третью группу входят страны, которым потребуется импортировать этот ресурс для удовлетворения своего внутреннего спроса. Среди них — Япония, Республика Корея, некоторые страны Европы и Латинской Америки.

Конечно, такая картина может сильно измениться в случае масштабных инвестиций в развитие новых рынков возобновляемых источников энергии и водородной инфраструктуры в странах с достаточным потенциалом, но без доступа к технологиям, ноу-хау и местным возможностям.

Одним из главных неизвестных элементов является стоимость капитала (средневзвешенная стоимость капитала, или WACC), которая в настоящее время сильно варьируется в разных странах (вставка 3.3).

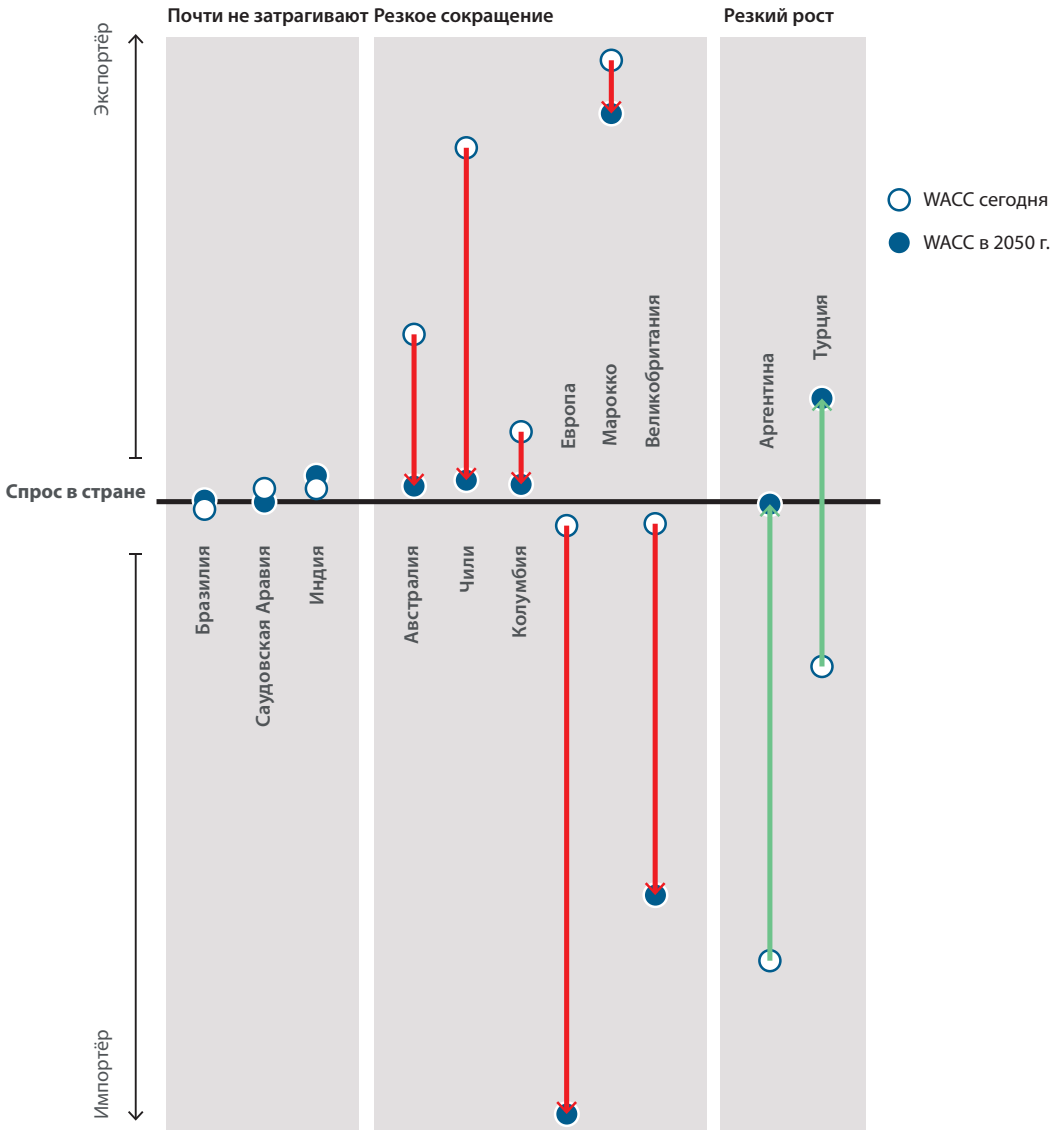
16 Ключевыми параметрами модели являются потенциал внутреннего производства и цена «синего» и «зелёного» водорода, а также импортная стоимость обоих вариантов водорода (которая сама по себе зависит от затрат на производство, (повторное) преобразование и транспортировку), IRENA (ещё не опубликовано-а).

### **ВСТАВКА 3.3** **ВАЖНОСТЬ ПРЕДПОЛАГАЕМЫХ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ ДЛЯ ПРОГНОЗОВ ПО** **ТОРГОВЛЕ ВОДОРОДОМ**

В будущем, когда будут доминировать возобновляемые источники энергии, стоимость энергии будет определяться в основном капитальными затратами. Предполагать, что различия в стоимости капитала, наблюдаемые в мире сегодня, сохранятся и в 2050 г., часто считается благоразумным подходом (Egli, Steffen and Schmidt, 2019). Однако если предположить, что эти различия сгладятся (Vogdanov, 2019), картина будущего полностью меняется (рисунок 3.5). Латинская Америка, Ближний Восток и Турция вместо импортёров стали бы экспортёрами «зелёного» водорода, а ситуация в Испании изменилась бы в противоположную сторону. Экспортный потенциал таких стран, как Австралия и Чили, у которых уже низкий уровень WACC, значительно уменьшился бы, а потребности ЕС и Германии в импорте сильно бы выросли.

# WACC

**Рисунок 3.5** Влияние предполагаемых издержек на производство водорода в отдельных странах



Примечание: на рисунке показаны объемы производства и спроса на «зелёный» водород по регионам или странам в 2050 г. на основе оптимистичных ориентировочных расчётов CAPEX: фотоэлектрическая энергия: 225-455 долл. США/кВт; наземная ветровая энергия: 700-1 070 долл. США/кВт; морская ветровая энергия: 1 275-1 745 долл. США/кВт; электролизёр: 130 долл. США/кВт. Производство «зелёного» водорода основано на оценке доступности земли для солнечных фотоэлектрических и ветровых установок. Спрос соответствует сценарию по ограничению глобального потепления 1,5 °С. Для объёмов производства и спроса используется логарифмическая функция, чтобы показать величины разного порядка на одной шкале. Благодаря этому ось становится безразмерной: её можно интерпретировать как индекс, а не потоки энергии. В варианте «WACC в 2050 г.» предполагается, что в будущем риски будут одинаковы в всех регионах мира. Вариант «WACC сегодня» означает, что у каждого региона свой показатель WACC, как это имеет место сегодня.

Эксперты полагают, что у Австралии, Чили, Марокко, Саудовской Аравии и Соединённых Штатов Америки наилучшие шансы стать крупнейшими производителями водорода к 2050 г. (см. рисунок В.3 в Приложении). Некоторые из этих стран, а именно Австралия, Саудовская Аравия и Соединённые Штаты Америки, уже сейчас экспортируют энергоресурсы. Они могут сохранить свои позиции в качестве экспортёров энергоресурсов, хотя и выйдут на гораздо более конкурентный рынок, так как «зелёный» водород можно производить почти везде. Другие страны, например, Чили, Марокко и Намибия, в настоящее время являются чистыми импортёрами энергии.<sup>17</sup> Для этих стран преобразование «зелёного» водорода станет крутым поворотом судьбы, поскольку высокий потенциал возобновляемых источников энергии открывает новые возможности. Геостратегическая важность стран, которые смогут стать успешными экспортёрами «зелёного» водорода и вторичного топлива, также должна повыситься (вставка 3.4).

17 В настоящее время Чили импортирует около 65% требуемой энергии, Марокко — 91%, а Намибия — 74% (Всемирный банк, без даты-а).

#### **ВСТАВКА 3.4**

#### **ОТ ИМПОРТЁРА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ К ЭКСПОРТЁРУ?**

#### **ВОДОРОДНЫЕ ПРОЕКТЫ В ОТДЕЛЬНЫХ СТРАНАХ-ИМПОРТЁРАХ ИСКОПАЕМЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА С ПОТЕНЦИАЛОМ ЭКСПОРТА «ЗЕЛЁНОГО» ВОДОРОДА**

**ЧИЛИ:** Чили выпустила стратегию для «зелёного» водорода в 2020 г. Страна планирует увеличить мощность электролизёров до 5 ГВт к 2025 г. и до 25 ГВт к 2030 г., производить самый дешёвый водород в мире к 2030 г. и стать одним из трёх ведущих мировых экспортёров водородного топлива к 2040 г. (Правительство Чили, 2020). Согласно расчётам, к 2030 г. страна сможет экспортировать «зелёный» водород и его производные на сумму 30 млрд долл. США (Mander, 2020). Водород вызывает всё больше интереса в Латинской Америке, главным образом благодаря высокому потенциалу этого региона в сфере возобновляемых источников энергии. Несколько стран в регионе уже опубликовали или готовятся выпустить национальные водородные стратегии и дорожные карты (рисунок 3.1).

**МАРОККО:** в 2019 г. Марокко создало Национальную комиссию по водороду (National Hydrogen Commission), а в январе 2021 г. опубликовало дорожную карту для «зелёного» водорода. Водород упоминается как ключевой сектор роста в национальной экономике. Предполагается, что к 2030 г. объём энергии, производимой на локальном водородном рынке достигнет 4 тераватт-часов (ТВт-ч), а энергии, поставляемой на экспорт, — 10 ТВт-ч, что в совокупности потребует строительства 6 ГВт новых мощностей на основе возобновляемых источников и поддержки создания более 15 000 прямых и сопутствующих рабочих мест (MEM, 2021).



### 3.3 СТРАТЕГИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА ДЛЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ИСКОПАЕМЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

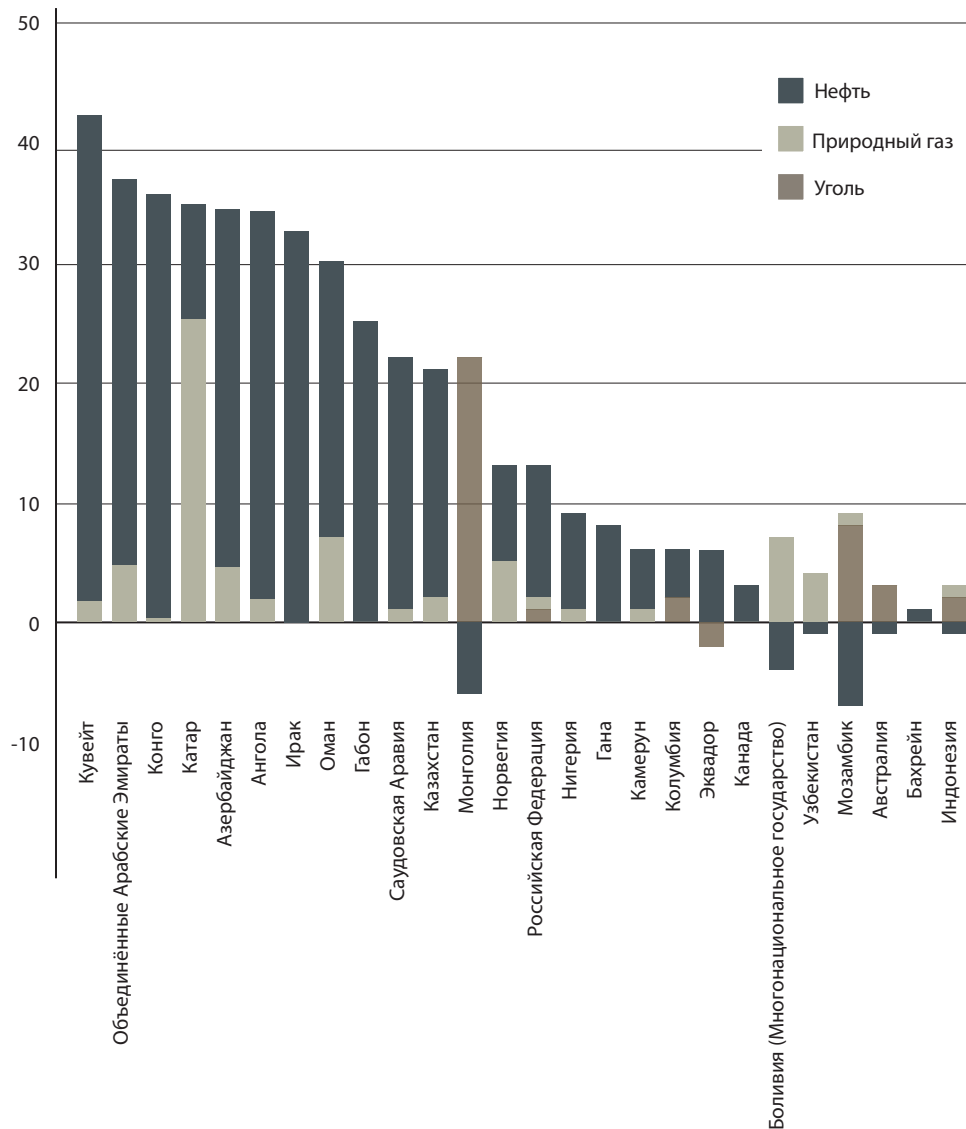
Энергетический переход сильно повлияет на производителей ископаемых видов топлива: весьма вероятно, что значительная доля запасов нефти, газа и угля никогда не будет извлечена и монетизирована. Предзнаменование этих последствий проявилось во время пандемии COVID-19 в 2020 г., когда снижение цен и падение спроса обесценили все запасы нефти и газа примерно на четверть (МЭА, 2020). Хотя по мере осуществления энергетического перехода рыночная доля производителей с низкими затратами будет расти, даже их выручка сильно уменьшится ввиду ожидаемого общего сокращения рынка (МЭА, 2021а). Несколько производителей нефти и газа уже столкнулись со снижением своего суверенного кредитного рейтинга. Двадцать стран с самым высоким отношением чистого экспорта ископаемых видов топлива к валовому внутреннему продукту (ВВП) (рисунок 3.6) пережили конечное медианное снижение кредитного рейтинга на 1,6 пункта в период с 2015 по 2020 гг. (Fitchratings, 2021). По мере прогресса декарбонизации страны-производители будут вынуждены снижать зависимость своей экономики от нефти и газа.

**НАМИБИЯ:** богатейшие солнечные и ветровые энергетические ресурсы страны привлекли внимание инвесторов. Правительство признало «зелёный» водород и «зелёный» аммиак новыми перспективными ресурсами для экспорта (Правительство Намибии, 2021). Оно учредило национальный Совет по «зелёному» водороду (Green Hydrogen Council) и назначило специального комиссара по «зелёному» водороду. Также правительство изучает вопрос строительства завода для изготовления лопастей ветровых турбин, экологичного сталелитейного завода, а также запуска линии для производства аммиачных удобрений (Weidlich, 2021). Масштаб этих предлагаемых проектов очень велик по сравнению с экономикой Намибии, что указывает на потенциал «зелёного» водорода для преобразования национальной экономики (Geingob, 2021).



**Рисунок 3.6** Риск незадействованных активов для крупнейших нетто-экспортёров ископаемых видов топлива, 2019 г.

Чистая экспортная выручка как доля ВВП (%)



Источник: UN Comtrade (2021) и Всемирный банк (без даты-б)

Примечание: в 2019 г. средняя цена сырой нефти марки Brent (международной эталонной марки) составила 64 долл. США за баррель. Её средний уровень в 2010-2020 гг. составлял 76,2 долл. США за баррель (Управление энергетической информации (EIA), без даты).

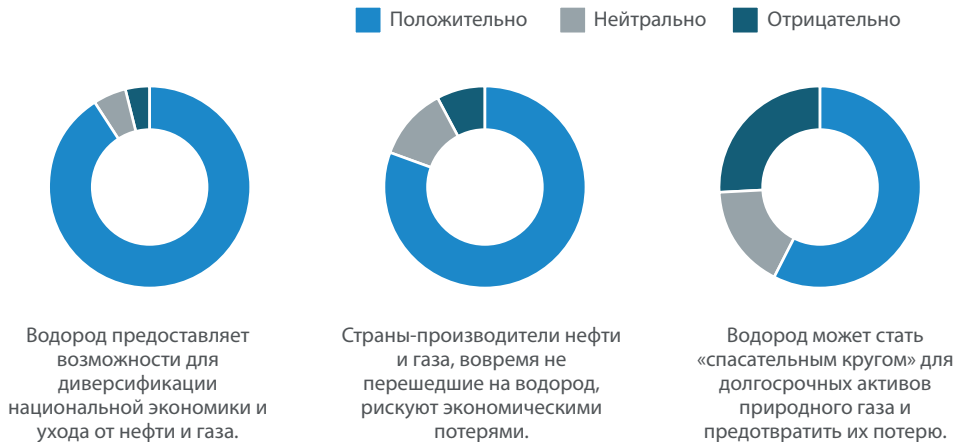


Чистый водород предлагает странам-экспортёрам нефти и газа привлекательную стратегию диверсификации экономики по мере того, как крупнейшие экспортные рынки будут переключаться на низкоуглеродные и безуглеродные виды топлива и энергоносители (рисунок 3.7). У стран, добывающих нефть и газ, хорошие предпосылки для перехода на водород, так как они могут эффективно использовать имеющуюся экспортную энергетическую инфраструктуру (порты, трубопроводы и хранилища); квалифицированную рабочую силу, знакомую с производством, преобразованием и транспортировкой энергетических видов топлива и газов; а также налаженные торговые отношения в сфере энергетики.

В преддверии конференции COP26 несколько экспортёров, включая Австралию, Россию, Саудовскую Аравию и Объединённые Арабские Эмираты, установили для себя цель достижения нулевых выбросов. Чистый водород — это жизненно необходимый инструмент для достижения такой цели. Ряд стран-производителей ископаемых видов топлива уже приняли национальные стратегии по водороду (Австралия, Канада, Колумбия, Норвегия, Россия и Великобритания) или готовятся сделать это.

В стратегиях экспортёров ископаемых видов топлива часто упоминается возможность для развития новых экспортных отраслей с помощью водорода (вставка 3.5). Некоторые из них (например, Австралия, Канада и Норвегия) поддерживают технологически нейтральный подход и прямо предусматривают возможность «синего» водорода. Австралия и Канада установили, что для того, чтобы водород, получаемый из ископаемых видов топлива, мог считаться чистым, ожидаемая или необходимая степень улавливания углерода, образующегося при его производстве, должна быть не ниже 90% (Longden *et al.*, 2022).

**Рисунок 3.7 Мнения экспертов о водородных стратегиях и влиянии на производителей нефти и газа**



Источник: экспертное исследование агентства IRENA (см. вставку 2.2).

**ВСТАВКА 3.5****ПОВОРОТ В СТОРОНУ ВОДОРОДА? ВОДОРОДНЫЕ СТРАТЕГИИ В ОТДЕЛЬНЫХ СТРАНАХ-ЭКСПОРТЁРАХ ИСКОПАЕМЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА**

**АВСТРАЛИЯ:** Австралия намерена стать «крупнейшим мировым игроком» в производстве чистого водорода и торговле им к 2030 г. Страна рассматривает водород как свою «следующую крупную статью экспорта». К 2030 г. Австралия хочет стать одним из трёх ведущих мировых экспортёров водорода на азиатские рынки (Правительство Австралии, 2019). Правительство инвестировало более 1 млрд долл. США в стимулирование отечественной водородной отрасли и в том числе организовало совместное финансирование семи водородных хабов (Правительство Австралии, 2021). Девять проектов гигаваттного масштаба в сфере «зелёного» водорода запланированы или находятся на стадии разработки, хотя правительство не исключает и производство «синего» водорода. Кроме того, Австралия заключила сделки с перспективными экспортными рынками, такими как Германия, Япония и Сингапур.

**КАНАДА:** стратегия Канады определяет новые возможности для экспорта и указывает, что у неё хорошие шансы стать «ведущим мировым экспортёром чистых видов топлива» (Правительство Канады, 2020). К 2050 г. страна намерена стать одним из трёх ведущих производителей чистого водорода в мире. Хотя Канада рассматривает многие технологии производства, в её стратегии упоминается необходимость в конечном итоге переходить во всё большей степени на способы производства, основанные на возобновляемых источниках энергии, или безуглеродные методы, и прямо указываются огромные возможности страны в области гидроэнергии.

**НОРВЕГИЯ:** Норвегия является крупным экспортёром газа в Европу: она удовлетворяет около четверти потребностей Европы в газе, поставляя его в основном по трубопроводам. Equinor, норвежская энергетическая компания, в настоящее время изучает возможность поставок природного газа в Германию или Нидерланды, где его можно будет преобразовывать в «синий» водород. Затем водород будет поступать на сталепрокатный завод в г. Дуйсбург (Германия), а углекислый газ транспортироваться обратно на хранение под морским дном норвежского шельфа Северного моря (Equinor и OGE, 2019).

**ОМАН:** Оман разрабатывает национальную водородную стратегию с целью достижения ориентированного на водород общества к 2040 г. Страна также планирует стать крупным экспортёром «зелёного» водорода или «зелёного» аммиака. Уже было объявлено о нескольких гигаваттных проектах, в рамках которых планируется эффективно использовать богатые солнечные и ветровые ресурсы в мухафазе Эль-Вуста и задействовать порт Дуки на Аравийском побережье для экспорта. Электроснабжение крупнейшего из этих проектов будет осуществляться от солнечных и ветровых установок мощностью 25 ГВт (Argus, 2021).

**РОССИЯ:** Россия ставит цель стать одним из крупнейших экспортёров чистого водорода, главным образом его «синего» варианта. По словам премьер-министра Михаила Мишустина, «водородная энергетика снизит риски потери рынков энергоносителей» (Правительство России, 2021). Россия намерена занять 20% мирового рынка водорода к 2030 г., что превышает её нынешнюю долю на рынке природного газа (РИА Новости, 2021). К середине столетия Россия предполагает экспортировать до 50 миллионов тонн водорода, ежегодно пополняя бюджет ещё на 23-100 млрд долл. США (Patonia, 2021).



**САУДОВСКАЯ АРАВИЯ:** в июле 2020 г. страна объявила о запуске проекта Helios Green Fuel Project стоимостью 5 млрд долл. США, в рамках которого планируется создать производство «зелёного» водорода и «зелёного» аммиака при полном электроснабжении от солнечных и ветровых установок. Ожидается, что предприятие начнёт работу в 2025 г. в мегагороде Неом, который планируется построить на побережье Красного моря вблизи границ Саудовской Аравии с Египтом и Иорданией (HELIOS, без даты). Государственная нефтяная компания Saudi Aramco приобрела долю в 70% в компании Saudi Basic Industries Corporation, которая является третьим крупнейшим в мире экспортёром аммиака (Aramco, 2020a). В сентябре 2020 г. Saudi Aramco поставила первую партию «синего» аммиака в Японию для его использования в производстве электроэнергии (Aramco, 2020b). На пресс-конференции, состоявшейся в конце 2020 г., саудовский Министр энергетики Принц Абдулазиз бин Салман заявил, что в отношении его страны «не будет ставиться под сомнение её репутация крупнейшего в мире экспортёра водорода» (Ratcliffe, El Wardany and Martin, 2020).

**ОБЪЕДИНЁННЫЕ АРАБСКИЕ ЭМИРАТЫ (ОАЭ):** в водородной дорожной карте ОАЭ, выпущенной в ноябре 2021 г., поставлена цель сделать страну лидером в сфере экспорта «синего» и «зелёного» водорода. ОАЭ намерены занять 25% мирового рынка низкоуглеродного водорода к 2030 г. Более семи проектов уже находятся на этапе реализации с участием крупных компаний, включая Водородный альянс Абу-Даби (Abu Dhabi Hydrogen Alliance), в который входят Национальная нефтяная компания Абу-Даби (Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC)), государственная инвестиционная компания Абу-Даби Mubadala и государственная холдинговая компания ADQ. ADNOC заключила соглашения о партнёрстве с такими странами, как Япония (ADNOC, 2021a), Малайзия (ADNOC, 2021b) и Республика Корея (ADNOC, 2021c), для изучения вариантов торговли водородом и уже продала четыре пробные партии «синего» аммиака (Emirates News Agency, 2021).



Производство «синего» водорода может быть привлекательным для стран с запасами дешёвого газа. Ряд экспортёров нефти и газа, в том числе Австралия и некоторые солнечные и ветреные страны в Северной Африке и Персидском заливе, также могли бы стать конкурентоспособными производителями «зелёного» водорода. Ожидается, что к 2050 г. общая экспортная выручка от продажи нефти и газа существенно сократится. Хотя трансграничная торговля водородом может значительно вырасти, эксперты сомневаются в том, что водород обеспечит такие же доходы, какие сегодня приносят нефть и газ (рисунок 3.8). Таким образом, водород не может рассматриваться как новый, безуглеродный «вид нефти». В отличие от нефти и газа, водород — это бизнес, основанный на преобразовании, а не на добыче, вследствие чего возможности для получения рентажных платежей, вероятно, будут ограничены (UCL, без даты). Водородный бизнес будет более конкурентным, и в нём будет больше участников, чем в случае с нефтью и газом. По мере падения себестоимости «зелёного» водорода на водородные рынки будут приходить новые и разнообразные игроки.

**Рисунок 3.8** Мнения экспертов о будущих водородных доходах и структуре рынка



Источник: экспертное исследование агентства IRENA (см. вставку 2.2).

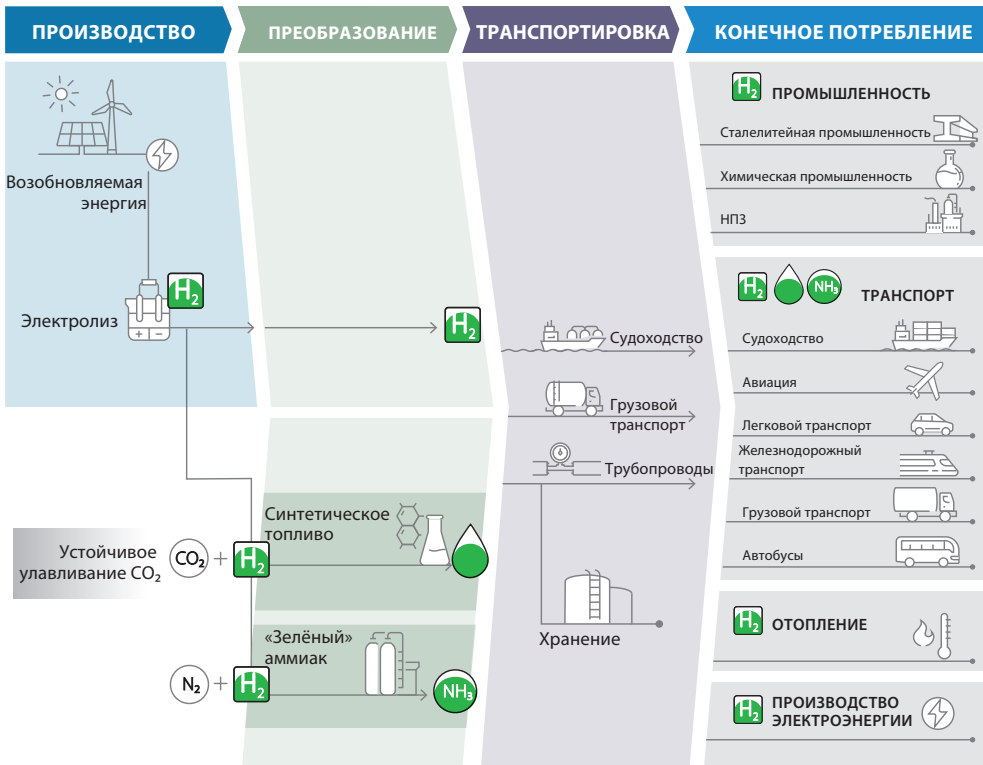


### 3.4 ПОЯВЛЕНИЕ НОВЫХ ЛИДЕРОВ В СФЕРЕ ТЕХНОЛОГИЙ

За последние несколько лет безуглеродные решения развивались быстрее, чем ожидалось, создавая новые возможности для повышения благосостояния и для его потери (Systemiq, 2020). Участие в производственно-сбытовых цепочках для экологичных технологий в сфере энергетики, например, для чистого водорода, может повысить экономическую конкурентоспособность, национальную безопасность и энергетическую независимость страны.

Технологическое лидерство может развиваться, опираясь на многие аспекты производственно-сбытовой цепочки водорода. В странах, стремящихся экспортировать водород или его производные, существует большое разнообразие прав собственности на технологии, что может отражаться на их способности влиять на стандарты и общие условия работы. Например, Австралия, Канада и Саудовская Аравия разработали сотни изобретений в период с 2010 по 2020 гг. (веб-инструмент IRENA INSPIRE, 2021). В Колумбии, Египте, Марокко, Омане и Объединённых Арабских Эмиратах было гораздо меньше активности в этом направлении (за этот период в каждой из этих стран было подано до трёх связанных с водородом патентных заявок). В каждом из сегментов производственно-сбытовой цепочки страны могут играть ведущие роли различными способами (см. рисунок В.8 в Приложении). В данном разделе рассматриваются инновации и производство.

**Рисунок 3.9** Возможности для лидерства в сфере технологий в производственно-сбытовых цепочках «зелёного» водорода



Источник: IRENA (2020b).

Примечание: CO<sub>2</sub> = углекислый газ; N<sub>2</sub> = молекулярный азот.

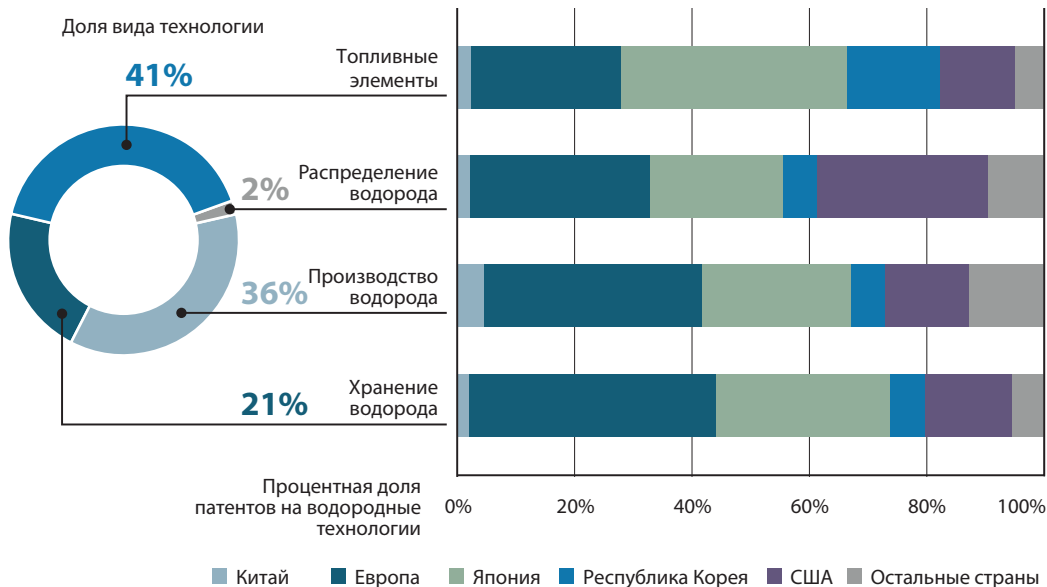
### Лидеры в сфере инноваций

Картина технологий и компаний, связанных с водородом, продолжает меняться. Новая целенаправленная политика стала стимулом для инноваций на всех этапах производственно-сбытовой цепочки водорода. Чтобы оценить, насколько страны готовы конкурировать за инновации в сфере чистого водорода, целесообразно рассмотреть два показателя: расходы на научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки (НИОКР) и патенты.

На страны Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) исторически приходилась основная часть расходов на НИОКР в сфере водорода, хотя их быстро догоняет Китай, о чём свидетельствует шестикратное увеличение его государственных инвестиций в НИОКР в 2019 г. (МЭА, 2021 г.). Государственное финансирование в сфере водорода идёт примерно поровну по двум направлениям: топливные элементы и прочие сферы применения (МЭА, 2021 г.). Если наблюдаемый в последнее время рост инвестиций в НИОКР в сфере водорода сохранится, то государственная поддержка может вернуться к уровню, предшествовавшему концу 2000-х.

На страны ОЭСР приходится подавляющее большинство патентов в области водорода. Япония лидирует в исследованиях топливных элементов — в этой сфере на неё приходится почти 40% всех патентов. Европа занимает ведущие позиции в производстве водорода (в основном с использованием электролизёров) и технологиях хранения водорода (рисунок 3.10). На топливные элементы приходится около 41% всех связанных с водородом патентов, но самый быстрый рост в последние годы был зафиксирован в других областях, таких как производство и хранение. Преимущества, например, внутренняя добавленная стоимость, будут зависеть от того, где сосредоточена интеллектуальная собственность.

**Рисунок 3.10 Географическое распределение семейств патентов-аналогов, связанных с водородом, 2010-2020 гг.**



Источник: веб-инструмент IRENA INSPIRE.

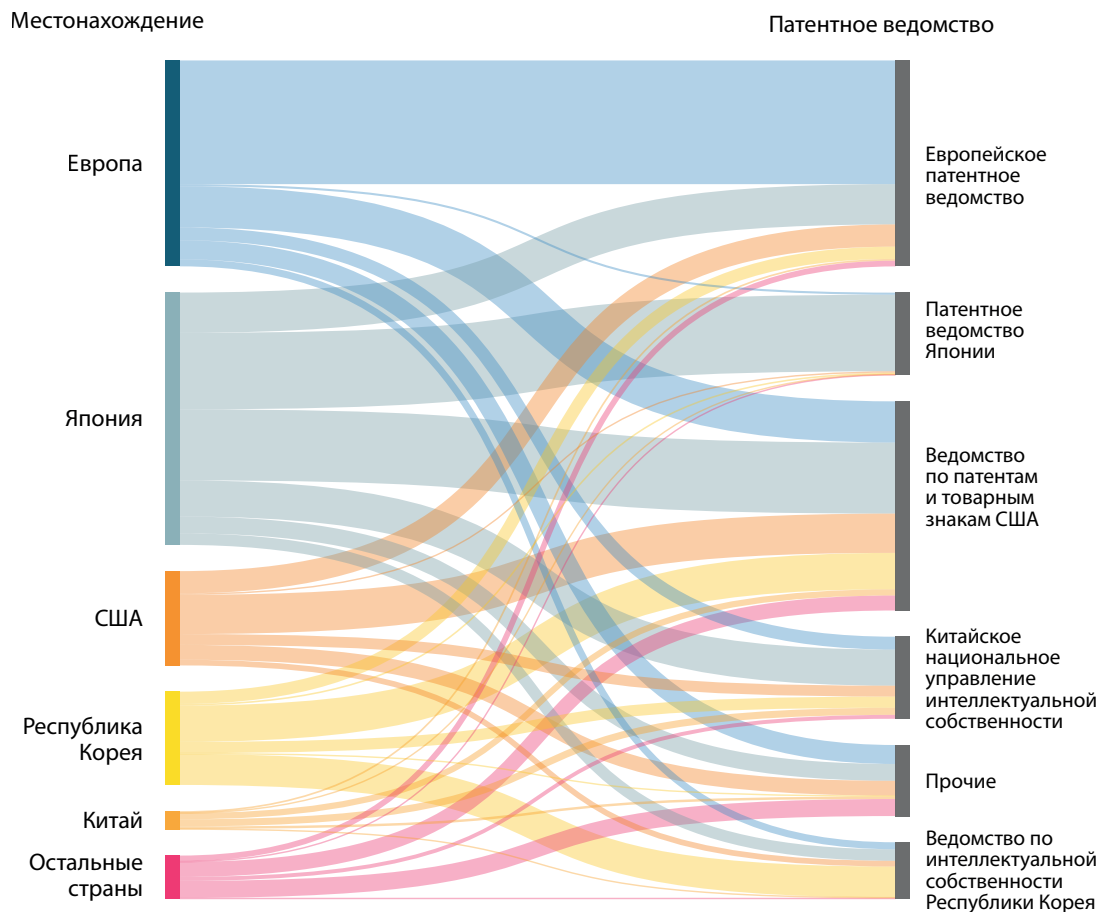
Примечание: данные по патентам за 2020 г. не являются полными ввиду соблюдения конфиденциальности на начальном этапе процесса оформления патента. В анализе рассматриваются пять ведущих участников данного сегмента и их патентные ведомства. Патентные заявки, подаваемые во Всемирную организацию интеллектуальной собственности, закрепляются за соответствующим получающим ведомством. В статистике регион заявителя и регион получающего ведомства учитываются в равной доле. Водородная технология определяется на основе патентных кодов подгрупп Кооперативной патентной классификации, которые касаются разработки высокоэффективных технологий, направленных на сокращение выбросов парниковых газов, образующихся в процессе генерации, передачи или распределения энергии — в той части, в которой прямо упоминается водород (Y02E60/34 Распределение, Y02E60/50 Топливные элементы, Y02E60/36 Производство и Y02E60/32 Хранение).

Рассматривая регионы, в которых обеспечена защита связанных с водородом изобретений, можно предположить, какие страны-лидеры в сфере технологий планируют начать их коммерческое использование (рисунок 3.11). В 2010-2020 гг. Европа и Соединённые Штаты Америки были двумя географическими регионами, в которых обеспечивалась надёжная защита изобретений. Большинство европейских изобретений (60%) защищены на европейском рынке; остальные защищены в других регионах, особенно в Соединённых Штатах Америки, где европейские изобретения составляют около 20% всех патентов. Хотя Япония разработала больше всего изобретений (36% от общего числа), лишь очень немногие иностранные изобретения защищены в Японии, что указывает на высокие технологические, но ограниченные рыночные возможности для таких изобретений. На фоне растущего числа международных партнёрств в сфере технологий Япония могла бы стать лидером в этой области, даже в качестве чистого импортёра водорода.

На другом конце спектра находится Китай: более 90% изобретений, защищённых Китайским национальным управлением интеллектуальной собственности, поступают из-за границы. В предыдущие десять лет Китай оставался привлекательным рынком в качестве центра производства. Эта тенденция может сохраниться.





**Рисунок 3.11** Поток изобретений в области водородных технологий, 2010-2020 гг.

Источник: веб-инструмент IRENA INSPIRE.

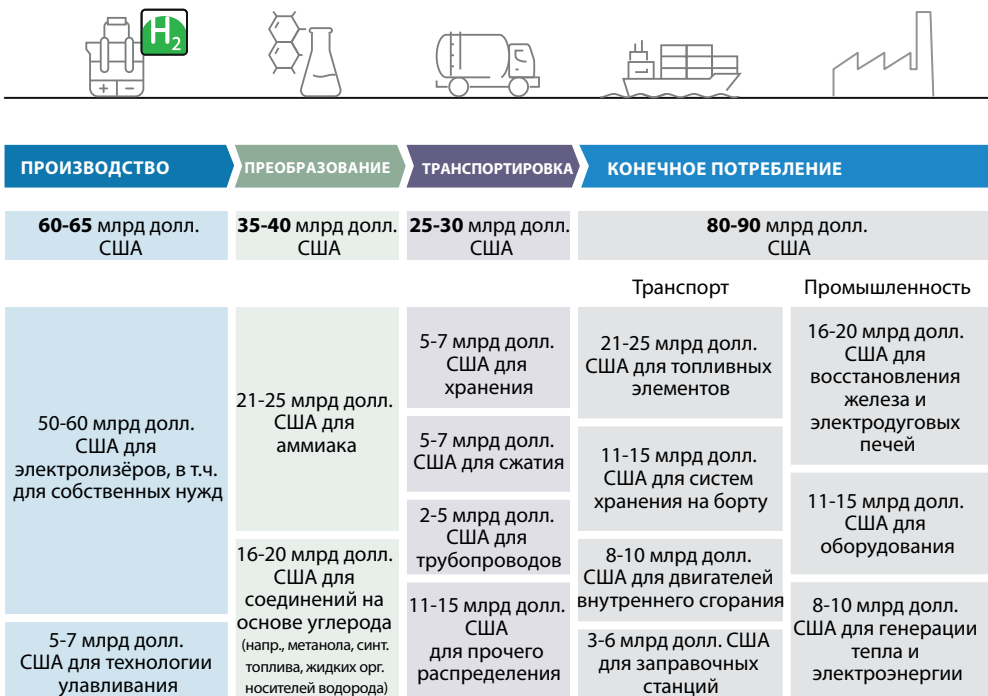
Примечание: поток изобретений от страны, разрабатывающей водородные технологии (слева) до рынка, где эти технологии защищены (справа).

Дополнительную информацию см. по ссылке: [https://public.tableau.com/app/profile/irena.resource/viz/IRENA\\_INSPIRE\\_Hydrogen\\_Patents/HydrogenTech](https://public.tableau.com/app/profile/irena.resource/viz/IRENA_INSPIRE_Hydrogen_Patents/HydrogenTech)

### Производство оборудования

Зарождающийся рынок для связанного с водородом оборудования характеризуется высокой сложностью и фрагментарностью. Полное обсуждение всех затронутых технологий выходит за рамки данного доклада. В этом разделе подробно рассматриваются лишь два основных вида оборудования в производственно-сбытовой цепочке водорода: электролизёры и топливные элементы. Эти две разновидности оборудования предоставляют странам и компаниям наибольшие возможности для извлечения выгоды в ближайшие годы и десятилетия и утверждения в качестве лидеров отрасли. Предварительные расчёты указывают на рыночный потенциал электролизёров в размере 50-60 млрд долл. США, а топливных элементов — в размере 21-25 млрд долл. США к середине века (рисунок 3.12). Эти технологии более освоены, чем технологии в других сегментах производственно-сбытовой цепочки. В экспертном исследовании IRENA электролизёры были признаны самым стратегически важным компонентом производственно-сбытовой цепочки, а топливные элементы рассматривались как необходимая составляющая лидерства в сфере технологий (см. Приложение).

**Рисунок 3.12** Расчётный потенциал рынка в отношении водородного оборудования и компонентов, 2050 г.



Источник: Ludwig et al. (2021).

Примечание: LOHC = жидкий органический носитель водорода.

### Электролизёры

Электролизёры используются уже не один десяток лет. На протяжении 20-го века было изготовлено несколько щелочных электролизёров мощностью более 100 мегаватт (МВт) (таблица 3.1), часто вблизи плотин ГЭС, способных обеспечивать дешёвую электроэнергию. Возобновляемый водород использовался в основном для производства удобрений. Более того, до 1960-х гг. большинство удобрений, продаваемых в Европе, производилось на снабжаемых гидроэнергией электролитических и аммиачных установках в Рьюкане и Веморке (Норвегия) (Philibert, 2017). Таким образом, электролиз играл важнейшую роль в производстве продовольствия.<sup>18</sup>

<sup>18</sup> В преддверии Второй мировой войны электролиз также приобрёл большое военное значение. В 1930-х годах Рьюкан стал первым центром по производству тяжёлой воды (дейтерия) в промышленных количествах в виде побочного продукта электролиза воды. Поскольку дейтерий можно было использовать для разработки ядерного оружия, это место стало стратегической горячей точкой во время Второй мировой войны.

**Таблица 3.1 Исторические примеры крупномасштабных предприятий по производству водорода путём электролиза**

Местоположение предприятия (страна, город)	Мощность, МВт	Год ввода в эксплуатацию
 Норвегия (Рьюкан)	165	1929
 Канада (Трейл)	90	1939
 Норвегия (Гломфьорд)	160	1953
 Индия (Нангал)	125	1958
 Перу (Куско)	25	1958
 Египет (Асуан)	160	1960
 Зимбабве (Квекве)	95	1974

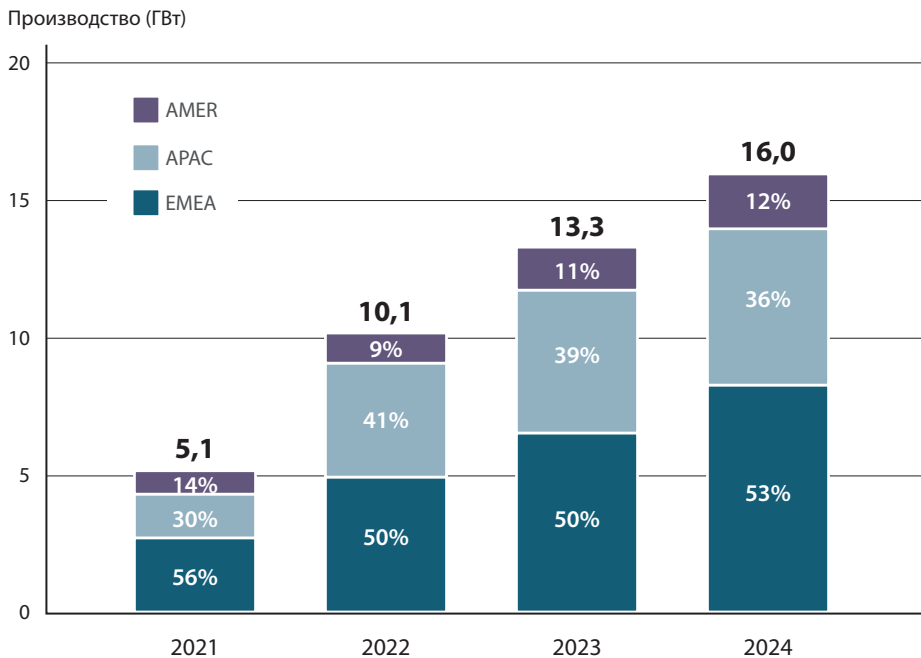
Источник: Smolinka, Günther and Garcke (2011); Godula-Jopek (2015).

Примечание: все эти предприятия, кроме предприятия в Перу, были закрыты или переведены на ископаемые виды топлива.

Несмотря на более чем 100-летний опыт работы с системами электролиза воды и тысячи установок по всему миру, к 2014 г. эта отрасль считалась небольшой и фрагментированной (FCH JU, 2014). Хотя эта технология и была отработана, электролитическое производство водорода не было способно конкурировать с ископаемыми видами топлива (Godula-Jopek, 2015).

В настоящее время возможности, появляющиеся в результате снижения стоимости возобновляемой электроэнергии, и необходимость сокращения глобальных выбросов до нулевого уровня дают толчок для возрождения электролитической отрасли. В 2018 г. годовая глобальная производственная мощность электролизёров составляла около 135 МВт (IRENA 2020a). Ожидается, что к 2024 г. она вырастет до 16 ГВт (рис. 3.13). Согласно заявлениям, несколько гигафабрик (предприятий с производственной мощностью, измеряемой в гигаваттах) будут производить электролизёры в промышленных масштабах, в том числе в Австралии, Франции, Индии, Италии, Норвегии, Испании и Великобритании (IRENA, 2021b; Bullard, 2021; Brisbane Times, 2021; La Repubblica, 2021). Ожидается, что такие крупные проекты обеспечат беспрецедентное сокращение стоимости электролитического водорода посредством достижения экономии масштаба благодаря массовому производству и полностью автоматизированным производственным линиям.

**Рисунок 3.13** Расчётные мировые мощности по производству электролизёров, 2021-2024 гг., на основе инвестиционных планов



Источник: BloombergNEF (2021b).

Примечание: AMER = Северная и Южная Америка; APAC = Азиатско-Тихоокеанский регион; EMEA = Европа, Ближний Восток и Африка

Европа традиционно занимала сильные позиции в производстве электролизёров. Даже сегодня примерно половина всех производителей электролизёров и большинство поставщиков их компонентов сосредоточены в Европе (Fraunhofer ISE, 2020). Согласно объявленным инвестиционным планам, прогнозируется, что на страны Европы, Ближнего Востока и Африки в ближайшие годы будет приходиться половина производственной мощности электролизёров (см. рисунок 3.13).<sup>19</sup> Европейская стратегия в сфере водорода прямо направлена на сохранение конкурентных преимуществ этого региона в производстве электролизёров.<sup>20</sup> Европа всеми силами стремится не допустить, чтобы её зарождающийся сектор водородных технологий повторил судьбу сектора солнечных фотоэлектрических установок, в котором Европа, и особенно Германия, в своё время уверенно доминировала, но который обвалился из-за появления более дешёвых китайских солнечных модулей (Amelang, 2020).

Хотя Европа и располагает самыми большими производственными мощностями, Китай является лидером в сфере поставок электролизёров (BloombergNEF, 2021b). Кроме того, китайские электролизёры гораздо дешевле европейских. По некоторым сведениям, китайские производители могут выпускать стандартные щелочные электролизёры по цене 300 долл. США/киловатт мощности, что на 75% дешевле аналогичных установок, изготовленных на Западе (BloombergNEF, 2021b). Некоторые, в основном западные, компании инвестируют в более инновационные технологии, такие как протонообменная мембрана, твердооксидные и щелочные электролизёры высокого давления. Несмотря на более высокие затраты, эти технологии имеют свои преимущества. Например, электролизёры с протонообменной мембраной более компактны и лучше подходят для работы с электроэнергией на основе переменных возобновляемых источников, чем стандартные щелочные электролизёры.<sup>21</sup>

Компании в Китае, Европе и Японии задали хороший старт производству и продаже электролизёров, но этот рынок всё ещё находится на начальной стадии своего развития и относительно невелик. По мере увеличения мощности водородных производственных установок с мегаваттных до гигаваттных масштабов с целью удовлетворения ожидаемого взрывного спроса на чистый водород, распределение долей на рынке может быстро измениться. Инновации и новые технологии также могут поменять структуру рынка электролизёров и текущую картину производства.



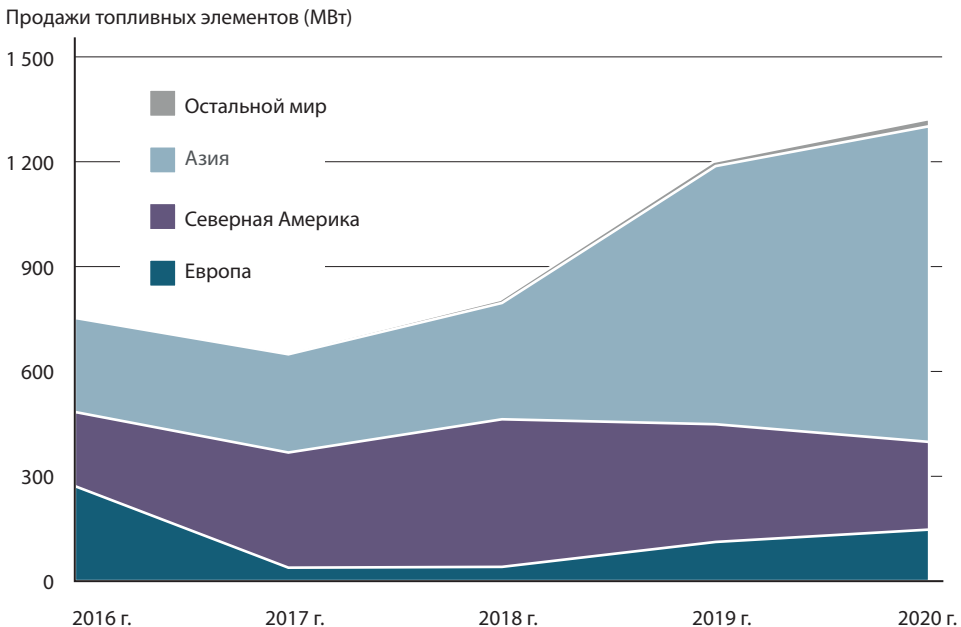
- 19 На Европу приходится гораздо большая производственная мощность в этой категории. Согласно другой оценке, производственная мощность электролизёров в Европе увеличится до примерно 18 ГВт к 2025 г. (Gas for Climate, 2021b).
- 20 В водородной стратегии Европейского союза отмечается, что предпочтение Европы в отношении возобновляемого водорода «опирается на промышленное преимущество Европы в производстве электролизёров» и что «Европа обладает высокой конкурентоспособностью в производстве на основе технологий чистого водорода и имеет хорошие предпосылки эффективно использовать глобальное освоение чистого водорода в качестве энергоносителя» (Европейская комиссия, 2020a).
- 21 Эти отличия, вероятно, будут малозначимы для крупных проектов или могут быть устранены с помощью технических решений и аккумуляторов (Wang, 2021).

### Топливные элементы

Топливные элементы — это устройства, которые электрохимическим путём превращают водород в электричество. В сущности они представляют собой электролизёры, работающие в обратном порядке: вместо использования воды и электричества для выработки водорода они используют водород и воздух для получения электричества и воды.<sup>22</sup> Топливные элементы можно использовать в стационарных системах (например, на крупных электроэнергетических установках). Кроме того, их можно применять на транспорте, например, в автомобилях, грузовом транспорте, автобусах, вилочных погрузчиках, на пароме и судах, а также в самолётах.

Исторически сложилось, что основная поддержка в рамках водородной политики была направлена на автомобили с топливными элементами и на водородные заправочные станции (IRENA, 2020b). В период между 2008 и 2020 г. стоимость автомобильных топливных элементов упала примерно на 70% (Kleen and Padgett, 2021), и можно ожидать, что по мере наращивания масштабов производства она будет падать и дальше. Однако глобальные поставки топливных элементов растут сравнительно небольшими темпами. В 2020 г. общая мощность топливных элементов, проданных по всему миру, составила 1,3 ГВт. Большая часть мощностей была задействована для выпуска топливных элементов для автомобилей, автобусов и грузового транспорта в Азии (рисунок 3.14): в 2020 г. было продано порядка 8 000 транспортных средств на топливных элементах (E4Tech, 2021). Хотя это и самый высокий имеющийся показатель, он не идёт ни в какое сравнение с 3 миллионами автомобилей, проданных по всему миру в том же году (МЭА, 2021е).

**Рисунок 3.14 Продажи топливных элементов по регионам их внедрения, 2016–2020 гг.**

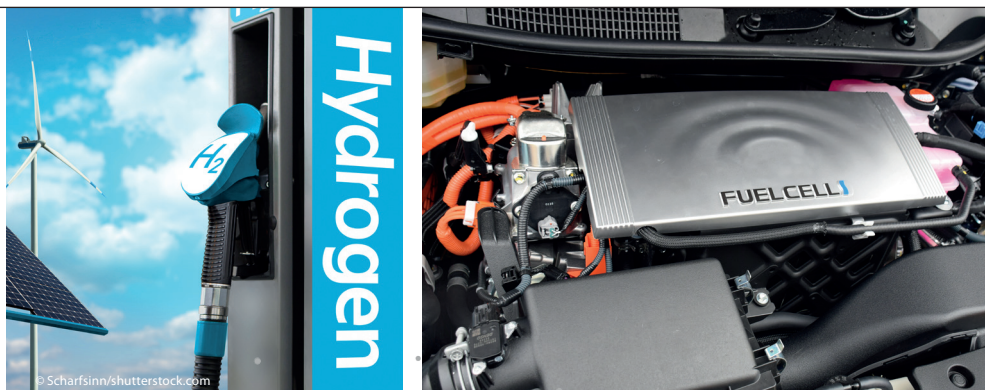


Источник: E4Tech (2021).

<sup>22</sup> Один тип электролизёров — твердооксидные электролизные ячейки — по сути представляют собой соответствующие твердо-оксидные топливные элементы, работающие в обратном режиме.

Тем не менее, ряд стран настойчиво продвигает топливные элементы во многих секторах конечного потребления. Китай поставил цель – 1 миллион транспортных средств на топливных элементах в эксплуатации к 2030 г. В Японии установлено 400 000 коммунальных систем на топливных элементах, при этом к 2030 г. их количество планируется довести до 5,3 миллионов. Для выработки электроэнергии Республика Корея к 2040 г. планирует изготовить топливные элементы общей мощностью 15 ГВт (из которых 7 ГВт планируется экспортировать). В Европе коалиция компаний приняла решение к 2030 г. ввести в эксплуатацию до 100 000 большегрузных автомобилей на водородных топливных элементах. В Калифорнии официально объявлено о планах построить 200 водородных заправочных станций к 2025 г. (Калифорнийский совет по ресурсам атмосферы (CARB), 2019), а в стратегических документах к 2030 г. намечено создать 1 000 таких станций для обслуживания 1 миллиона транспортных средств на топливных элементах (CACFP, 2018).

В отличие от роли электролизёров, значение топливных элементов в энергетическом переходе всё ещё определяется. В ближайшие годы инновации в сфере топливных элементов могут привести к изменениям на рынках и смене приоритетов. В любом случае общий размер такого рынка, вероятно, будет меньше, чем рынок электролизёров.







© Nguyen Quang Ngoc Tonkin/shutterstock.com



### 3.5 ПРОМЫШЛЕННОЕ РАЗВИТИЕ В СТРАНАХ, БОГАТЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

В течение многих веков доступ к энергии был одним из главных факторов, определяющих место ведения производственной деятельности. Начиная с 12-го века — от династии Сун в Китае до Англии в эпоху промышленной революции и до Верхнего Среднего Запада в Соединённых Штатах в 20-м веке — сталелитейное производство появлялось в регионах с доступом к углю и железной руде (Lovins, 2021b). Уголь — это громоздкий, тяжёлый и дорогостоящий материал для перевозки. Поэтому было более эффективным производить сталь в местах с залежами угля, а затем перевозить сталь, а не поставлять уголь в места производства стали (McWilliams and Zachmann, 2021).

В регионах с богатыми месторождениями угля часто возникали другие отрасли. В 70-х гг. 18 века Адам Смит в своём «Исследовании о природе и причинах богатства народов» отметил, что «по всей Великобритании мануфактуры устраивались главным образом в угольных районах» (Smith, 1776). Один специалист по истории экономики отметил, что «карта промышленной революции в Британии, как хорошо известно, — это просто карта угольных месторождений» (Pollard, 1981). Лишь начавшееся в 19-м веке массовое снижение стоимости грузовых перевозок позволило промышленным центрам стать независимыми от близости к природным ресурсам — явление, описанное как «смерть расстояний» (Glaeser and Kohlhase, 2004).

Глобальный энергетический переход изменит источники получения, преобразования и распределения энергии. В углеродно-нейтральном будущем доступ к энергии в значительной степени будет определяться возобновляемыми источниками электричества и видами топлива, получаемыми из таких сырьевых материалов (водород, аммиак и т.д.). Будет ли это изменение сопровождаться общей передислокацией производства в богатые возобновляемыми ресурсами регионы, зависит от трёх ключевых факторов: связанных с местоположением различий в стоимости возобновляемой энергии, затрат на транспортировку энергии и невозможности гибкого изменения существующих промышленных объектов и агломераций (McWilliams and Zachmann, 2021).

На выбор места промышленного производства влияют многие факторы, в том числе кадровый капитал, инфраструктура и затраты на персонал, но решающую роль может играть себестоимость энергии. Для энергоёмких отраслей, таких как производство железа, стали, химических и нефтехимических продуктов, цветных металлов и керамических материалов, производственная себестоимость энергии и сырьевого ископаемого топлива составляет основную долю в общих производственных расходах (Moysa Rivera and Boulamanti, 2016). По мере того как всё больше стран будут брать на себя обязательство по переходу к безуглеродной экономике и вводить инструменты политики, направленные на снижение углеродных выбросов, например, тарифы на выбросы углерода, производственная себестоимость ископаемых видов топлива будет расти ещё больше. В результате многим из этих отраслей для сохранения своей конкурентоспособности придётся рассмотреть возможность доступа к дешёвой чистой энергии.

Хотя стоимость возобновляемых источников энергии снижается по всему миру, между странами и регионами сохраняются ощутимые различия. Например, у многих развивающихся стран в тропических регионах есть конкурентное преимущество в сфере солнечной энергии.<sup>23</sup> В разных регионах капитальные затраты могут различаться более чем в три раза, а стоимость капитала — более чем в шесть раз. В результате у некоторых стран, использующих технологии солнечной энергии, уже есть трехкратное преимущество в затратах, и в лучших регионах этот показатель может быть гораздо выше.<sup>24</sup> Затраты на транспортировку возобновляемой энергии, будь то в виде электричества или водорода, остаются относительно высокими. Самый дешёвый способ транспортировки энергии — в материалах и продуктах. Таким образом, потенциал возобновляемых источников энергии обеспечивает значительное конкурентное преимущество для регионов с избытком возобновляемых ресурсов: они смогут стать центрами «зелёной» индустриализации.

Изменение места размещения промышленности имеет смысл в тех случаях, когда сокращение энергозатрат превышает дополнительные транспортные расходы. Передислокация может быть экономически целесообразной при работе с такими товарами как алюминий, аммиак, железо, топливо для реактивных двигателей и метанол (таблица 3.2).

23 Общепринятое определение понятия «развивающиеся страны» отсутствует. В данном докладе это страны, которые Всемирный банк определяет как страны с низким и средним доходом.

24 Расчёты основаны на средневзвешенной стоимости солнечной фотоэлектрической энергии в коммерческом секторе — 0,055/киловатт-час в Индии и 0,190/киловатт-час в Массачусетсе (Соединённые Штаты Америки) в 2020 г. (IRENA, 2021 г.).

**Таблица 3.2 Экономические факторы при выборе места производства**

	Мировое производство, 2021 г. (млн т/год)	Цена продукта (долл. США/т)	Цена «зелёного» продукта, 2030 г. (долл. США/т)	Стоимость транспортировки (ориентир.) (долл. США/т)	Выигрыш в стоимости энергии при смене местоположения (долл. США/т)
<b>Первичный алюминий</b>	65	2 500	2 500	70-100	425
<b>Аммиак</b>	200	250-400	600	100	340
<b>Цемент</b>	2 900	20	100	50	20
<b>Железо</b>	1 389	300-500	400-600	15-50	115
<b>Реактивное топливо</b>	250	300-500	1 000	50	600
<b>Метанол</b>	100	410-520	600	100	375
<b>Водород</b>	120	800	1 500	1 500	1 500

Источник: Gielen *et al.* (2021).

Примечание: значения выигрыша в стоимости энергии были рассчитаны путём умножения энергоёмкости на экономию затрат на единицу энергии.

Данные по транспортным расходам взяты из последних обзоров рынка. Цифры являются ориентировочными; они могут колебаться в зависимости от спроса и предложения. Выигрыш в стоимости энергии составляет 0,03 долл. США/киловатт-час для электроэнергии, 5 долл. США/гигаджоуль для тепловой энергии и 1,5 долл. США/килограмм для водорода. т = тонна.



Существует много примеров смены места размещения промышленных предприятий в зависимости от доступа к дешёвой энергии. После нефтяных кризисов в 70-х годах прошлого века Япония постепенно закрыла алюминиевые заводы и перешла на импорт алюминия. Алюминиевые заводы обычно расположены вблизи плотин ГЭС с большим объёмом дешёвой электроэнергии в самых разных местах, таких как Канада, Исландия, Мозамбик, Норвегия, Россия, Суринам, Таджикистан и Венесуэла (Боливарианская Республика Венесуэла). Аммиачные заводы размещаются вблизи источников дешёвого природного газа, например, в Норвегии, на Ближнем Востоке и в России. В местах с очень низкой себестоимостью ветровой и солнечной энергии, например, в удалённых районах Австралии, Чили, Омана и Саудовской Аравии, планируется строительство аммиачных заводов, работающих на возобновляемой энергии (Gielen *et al.*, 2021).

Конечно же, местоположение будущего производства не наносится на пустую карту, оно зависит не только от дешёвой энергии. Существующие промышленные кластеры и агломерации, вероятно, будут сопротивляться изменениям и придерживаться ранее выбранного пути развития. Например, в Европе большинство сталелитейных заводов с низким уровнем углеродных выбросов находится внутри существующих промышленных центров (McWilliams and Zachmann, 2021). Кроме того, страны захотят сохранить своё производство, одновременно ища способы декарбонизации отраслей-загрязнителей.

Создание новых производственных объектов в странах, изобилующих возобновляемыми источниками энергии, не обязательно повлечёт закрытие заводов в других местах. Напротив, во многих отраслях имеются возможности для роста. К 2050 г. ожидаемый мировой спрос на сталь — около 200 миллионов тонн/год — невозможно будет удовлетворить лишь дооборудованием существующих производственных центров (Bataille *et al.*, 2021). Будут появляться новые возможности для создания дополнительных чистых промышленных предприятий в странах с железной рудой и дешёвыми возобновляемыми источниками энергии.<sup>25</sup>

Кроме того, некоторые страны, не имеющие доступа к дешёвым возобновляемым ресурсам, смогут сохранить перерабатывающую промышленность точно также, как страны без нефтяных запасов могут иметь крупную нефтехимическую промышленность. Но некоторые энергоёмкие отрасли могут уйти в страны с избытком дешёвых возобновляемых ресурсов и экспортировать товары или полуфабрикаты (железо прямого восстановления и т.п.) в другие страны для завершающей переработки. Например, Австралия в настоящее время экспортирует железную руду в Китай, в угольных доменных печах которого производится половина всей стали в мире (Lovins, 2021b). Учитывая большой потенциал Австралии в сфере возобновляемой энергии, есть основания говорить о её переходе от экспорта кокса и железной руды к экспорту прямовосстановленного железа на основе возобновляемого водорода (Gielen *et al.*, 2020).

25 Для сталелитейного производства на основе водорода требуются высококачественные железорудные окатыши в качестве сырья. В настоящее время производится лишь ограниченное количество высококачественной руды, в основном в Северной и Южной Америке, Европе и на Ближнем Востоке, хотя у Бразилии, Индии, России и ЮАР также есть высококачественные запасы. Австралия — крупнейший в мире производитель железной руды — в настоящее время производит низкообогащённые руды. Австралийским производителям железной руды потребуется очищать свой продукт, возможно, увеличив производственные затраты, чтобы сделать его пригодным для производства стали на основе водорода (BloombergNEF, 2021c).

**ГЛАВА 4.**

# ТОРГОВЛЯ, БЕЗОПАСНОСТЬ И ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЬ

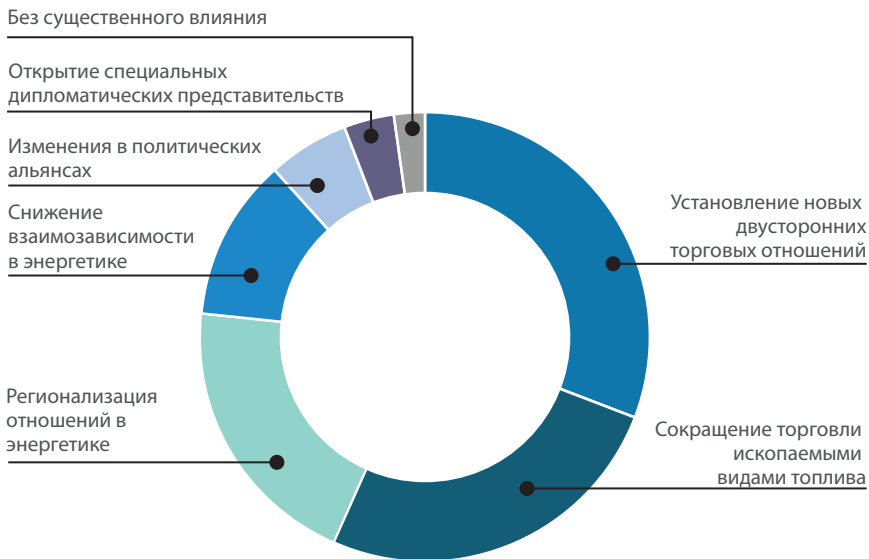
По мере того как водород становится предметом международной торговли, водородный сектор будет привлекать всё больше международных инвестиций. Это приведёт к изменениям в географии торговли энергией. У стран, которые раньше не торговали энергией друг с другом, есть возможность установить двусторонние энергетические отношения, построенные вокруг технологий и веществ, связанных с водородом. По мере изменения экономических отношений могут измениться и политические отношения между странами. Появление международного водородного рынка могло бы привести к формированию новой внешней политики и изменениям в двусторонних отношениях и альянсах (рисунок 4.1).



# 04



**Рисунок 4.1** Мнения стран-членов агентства IRENA о влиянии водорода на внешнюю политику к 2030 г.

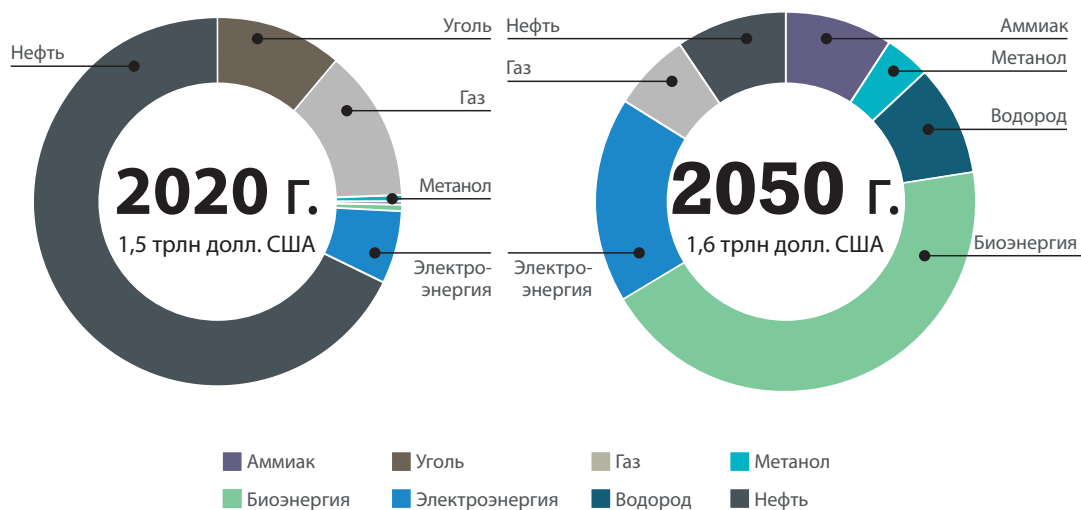


Источник: опрос членов агентства IRENA, 2021 г. (см. вставку 2.2).  
 Участники опроса могли выбрать несколько вариантов ответа. На диаграмме показаны доли поданных голосов.

#### 4.1 НОВАЯ ГЕОГРАФИЯ ТОРГОВЛИ

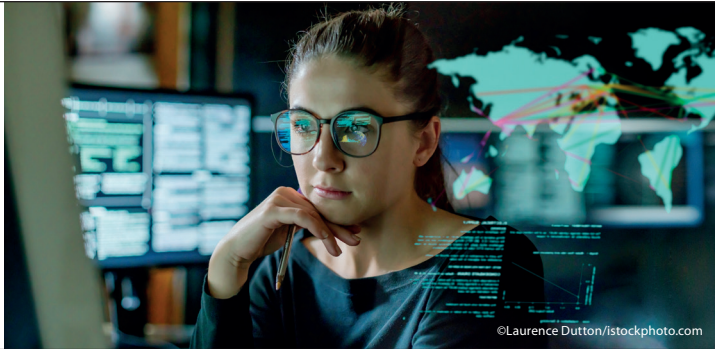
Влияние чистого водорода на международную торговлю энергоресурсами необходимо оценивать в контексте более широкого преобразования энергетического сектора. Переход от ископаемых видов топлива к возобновляемым источникам энергии коренным образом изменит характер и географию торговли энергией. Торговля энергоресурсами постепенно перейдёт к торговле энергетическими технологиями, сопутствующими компонентами и сырьевыми материалами (IRENA, 2019a). В результате стоимостный объём<sup>26</sup> торговли ископаемыми видами топлива сократится, а тот же показатель для электроэнергии, водорода и топлива, богатого водородом, увеличится (рисунок 4.2).

**Рисунок 4.2** Изменения в стоимостном объёме торговли энергоресурсами с 2020 г. по 2050 г.



<sup>26</sup> Такой показатель также отражает, помимо прочего, социальные, политические и геостратегические последствия.





©Laurence Dutton/istockphoto.com

Энергетические связи, вероятно, приобретут региональный характер, тем самым трансформируя геополитическую картину. Возобновляемые источники энергии могут использоваться в каждой стране, при этом возобновляемую электроэнергию можно экспортировать в соседние страны по линиям электропередачи. Кроме того, чистый водород может облегчить транспортировку энергии из возобновляемых источников на большие расстояния по трубопроводам и морем, тем самым задействуя ранее неиспользуемые ресурсы возобновляемых источников из удалённых регионов. Однако ввиду транспортных затрат рынок, вероятно, разделится на два направления: региональный рынок с доставкой энергоресурсов по трубопроводам, и глобальный рынок для аммиака, метанола и других жидких видов топлива. Другими словами, для водорода может сформироваться рынок, отличающийся большим разнообразием и дифференциацией по регионам, чем нефтегазовые рынки.

В настоящее время использование водорода сконцентрировано в промышленных прибрежных зонах, где расположены многие нефтеперерабатывающие и химические предприятия по всему миру. Такие порты представляют собой идеальный плацдарм для эффективного и масштабного использования чистого водорода. Со временем они могут стать импортными или экспортными хабами, а также хранилищами для бункеровки топлива в морском секторе. Такие порты и другие регионы, где вдоль производственно-сбытовой цепочки водорода сосредоточены различные направления деятельности (иногда называемые «водородными долинами»), могли бы на более позднем этапе наладить друг с другом водородные транспортные связи. Порты могли бы также стать узлами, от которых разветвлялась бы сеть водородных заправочных станций вдоль основных транспортных коридоров.

Некоторые существующие магистральные трубопроводы природного газа после их технической модификации можно было бы перепрофилировать для транспортировки водорода. Представленная на рисунке 4.3 карта существующих магистральных трубопроводов природного газа позволяет предположить, где можно было бы сохранить потенциальные трансграничные связи даже при переключении на «зелёный» водород. Очевидно, что не все регионы в одинаковой степени покрыты сетью трубопроводов природного газа. Обширные сети трубопроводов в Восточной Азии, Евразии и Северной Америке резко контрастируют с относительно редкими сетями на других континентах и почти полным отсутствием такой инфраструктуры в странах Африки южнее Сахары. Однако огромный потенциал Африки в сфере возобновляемых ресурсов открывает новые возможности для превращения этого континента в безуглеродный регион (вставка 4.1).



#### **ВСТАВКА 4.1**

### **ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ АФРИКИ В СЕКТОРЕ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ**

Африка обладает огромным потенциалом возобновляемой энергии, который можно использовать для удовлетворения спроса со стороны растущей морской торговли. В 2019 г. совокупный объём морской торговли в Африке составил 762 млн тонн, что соответствует примерно 7% всех морских торговых перевозок (Конференция ООН по торговле и развитию, 2020). Что касается морских грузовых перевозок, на Нигерию приходится почти треть их часть, затем следуют Марокко и ЮАР. Согласно прогнозам, к 2050 г. в связи с ростом доходов и экономики, а также населения масштабы морских грузовых перевозок могут вырасти более чем в 11 раз по сравнению с текущими показателями (Khalili *et al.*, 2019). Даже с учётом энергоэффективности и потенциального 45-процентного сокращения энергопотребления судами (IRENA, 2021d) спрос на электроэнергию для синтетических видов топлива может достичь 500 ТВт-ч. Для сравнения: совокупный спрос на электроэнергию в Африке в 2019 г. составил примерно 700 ТВт-ч (МЭА, 2019b). Рост потребления потребует от 100 ГВт до 350 ГВт электролиза (в зависимости от типа используемой возобновляемой электроэнергии) и может привлечь инвестиции на сумму 200-400 млрд долл. США.

Появление инфраструктуры для бункеровки новых видов топлива в секторе морских грузовых перевозок сопровождается преобразованием портов и строительством экспортных объектов. Работа в этом направлении уже начата. В ноябре 2021 г. Управление портов Намибии подписало протокол о намерениях с портом Роттердама с целью создания торгового маршрута для «зелёного» водорода. Порт планирует импортировать 20 млн тонн  $H_2$  к 2050 г., а у Намибии уже есть планы по реализации проекта на 0,3 млн тонн  $H_2$ , с началом экспорта к 2026 г. В Программе Partners for Growth Торгово-промышленной палаты Европейского союза в Южной Африке содержится оценка потенциала экспорта водорода, в том числе потенциальных объёмов, затрат и рынков (Roos and Wright, 2021). Благодаря этому в октябре 2021 г. было объявлено о подготовке технико-экономического обоснования для оценки потенциала проекта Бугубай (Воегобааи) в качестве центра экспорта «зелёного» водорода и аммиака. Это позволит расширить производственную деятельность в регионе и обосновать строительство порта, которое в настоящее время находится на этапе оценки.



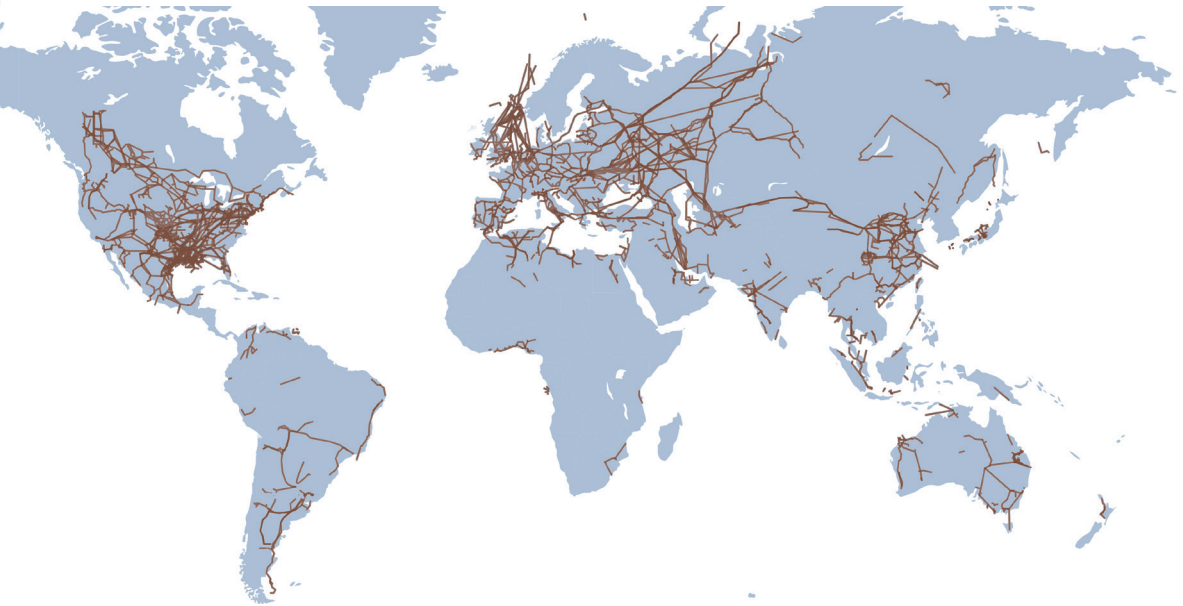
©AvigatorPhotographer/istockphoto.com



©fivepointsix/istockphoto.com

Ни одно решение по энергетической инфраструктуре не должно упускать из виду тот факт, что география такой инфраструктуры в декарбонизированной экономике может сильно отличаться от того, что мы имеем сегодня. Например, что касается предложения, возобновляемый водород, вероятно, будет производиться не там, где сегодня сконцентрированы нефтегазовые месторождения (Muttitt *et al.*, 2021). С другой стороны, масштабная электрификация конечных сфер потребления изменит масштаб и область спроса. Каждое новое инвестиционное решение рассчитано на длительный срок, поэтому постоянную трубопроводную инфраструктуру следует оценивать с точки зрения долгосрочной перспективы. Например, любая строящаяся сегодня газопроводная инфраструктура должна предусматривать возможность её перепрофилирования для перекачки чистых газов, например, водорода и биометана. Такое перепрофилирование сопряжено с техническими проблемами и экономическими затратами, которые необходимо учитывать при планировании инвестиций.

**Рисунок 4.3** Мировая карта магистральных трубопроводов природного газа



Источник: GreenInfo Network и Global Energy Monitor (2021).

Источник карты: Natural Earth, 2021 г.

Отказ от ответственности: данная карта приведена исключительно в целях наглядности. Показанные на карте границы не подразумевают какую-либо поддержку или принятие их агентством IRENA.

Торговля водородом создаёт возможности для нового регионального и межрегионального сотрудничества. Например, можно было бы наладить региональную торговлю водородом между Европой и Северной Африкой (van Wijk and Wouters, 2021), Австралией и Индо-Тихоокеанским регионом (Bowen, 2021) или между странами на африканском континенте (рисунк 4.4).

Кроме того, водород мог бы повлиять на будущие связи в морской торговле. Некоторые компании и правительства уже планируют международные производственно-сбытовые цепочки и маршруты транспортировки. Первая в мире трансокеаническая поставка водорода состоялась в декабре 2019 г., когда танкер с водородом, произведённым в Брунее и преобразованным в метилциклогексан, отправился в японский порт города Кавасаки. В том же месяце компания Kawasaki Industries выпустила Suiso Frontier — первый специальный танкер для пробных поставок жидкого водорода из Австралии в Японию. В сентябре 2020 г. первая партия полученного из водорода «синего» аммиака отправилась из Саудовской Аравии в Японию, где он был использован для выработки электроэнергии.<sup>27</sup> Такие пробные поставки и демонстрационные проекты свидетельствуют о наступлении новой эры в торговле энергоресурсами.

## 4.2 ФОРМИРОВАНИЕ ПРАВИЛ ИГРЫ

Водород не только изменит инфраструктуру и торговые потоки энергетической отрасли, но и потребует введения новых правил, стандартов и управления (Grinschgl, Pepe and Westphal, 2021). Формирование таких правил может стать предметом геополитической конкуренции или международного сотрудничества. Хотя установление общих правил по своему характеру может показаться технической процедурой, оно поможет определить технологии, которые будут преобладать на будущих рынках, и даст преимущество тем, кто их освоит. Стандарты разрабатываются для улучшения качества, безопасности и взаимозаменяемости различных товаров и услуг. Однако различающиеся стандарты способны привести к фрагментации рынка, подстегнуть конкуренцию между регулируемыми органами и создать торговые барьеры (IRENA 2020b, IRENA, 2021b).

Если водороду предстоит способствовать достижению целей повестки дня в области климата, крайне важно знать его углеродный след и влияние на устойчивость. Процесс сертификации должен привести к надлежащим стандартам надёжности, прозрачности и независимой проверки. Этого можно достичь с помощью сертификатов или «гарантий происхождения». Хотя в разных регионах уже появилось много различных схем сертификации,<sup>28</sup> международный стандарт в этой сфере всё ещё отсутствует. Более того, существующие схемы сильно различаются в том, как определяется устойчивость и где проводятся границы измерения выбросов вдоль цепочки поставок (Abad and Dodds, 2020). Обеспечение согласованной терминологии и данных для гарантии прозрачности и последовательности при преобразовании схем сертификации из одной в другую будет невозможно без международного сотрудничества.

27 Поскольку уловленный CO<sub>2</sub> использовался для производства метанола и повышенной нефтеотдачи, у этой партии водорода был существенный углеродный след.

28 К таким проектам относятся, в частности, CertifHy в Европейском союзе, пилотные проекты в Австралии и методические предложения на международном уровне от Международного партнёрства по водороду и топливным элементам в экономике (IRENA 2020b).

**Рисунок 4.4** Возможные водородные маршруты в Африке вдоль существующих и будущих трансафриканских автомагистралей



Источник: African Hydrogen Partnership (2019).

Источник карты: Natural Earth, 2021 г.

Отказ от ответственности: данная карта приведена исключительно в целях наглядности. Показанные на карте границы и названия не подразумевают какую-либо поддержку или принятие их агентством IRENA.

Эти обсуждения проходят под значительным влиянием геополитических мотивов. Страны заинтересованы устанавливать собственные стандарты, чтобы сохранить свои конкурентные преимущества. Например, схемы сертификации водорода, которые применяются лишь к выбросам, образующимся в процессе производства, исключали бы выбросы, возникающие во время транспортировки и, вероятно, были бы предпочтительны для производителей, расположенных далеко от потребительских рынков (White *et al.*, 2021). Подобным же образом, страны с большими запасами природного газа и транспортными системами могут склоняться к пороговым значениям выбросов парниковых газов, более благоприятным для производства «синего» водорода, или рассматривающим исключительно выбросы углерода, а не метана. Даже если бы выбросы метана были включены в соответствующие нормы, страны могли бы повлиять на методику или значения, используемые для их измерения. Например, производители газа могли бы издавать собственные отчёты о выбросах метана при своём производстве, что могло бы привести к занижению данных о таких выбросах (Piria *et al.*, 2021).

Также важными аспектами являются валютное выражение и механизм ценообразования для международной торговли водородом. Множество неизвестных факторов влияет на способ определения цены в международной торговле водородом (хабы, эталонные данные, механизмы ценообразования) и тип контрактов (долгосрочные, «бери или плати» или другая модель).<sup>29</sup> Использование в глобальных индексах определённой валюты способно усилить её позиции в переговорах по сделкам, касающимся не только водорода. По мере расширения рынка выбранная валюта позиционируется как глобальный ориентир. Указание определённой валюты снижает подверженность риску импортной стоимости, снимая привязку к конкретным валютным парам. Например, Европейский союз, который, вероятно, станет одним из основных рынков импорта, стремится установить свои будущие импортные поставки в евро (Европейская комиссия, 2020а). Европейская комиссия твёрдо убеждена в том, что такой ход сделал бы ЕС менее уязвимым для последствий «экстерриториального применения односторонних санкций третьими странами» (Европейская комиссия, 2021).

Целесообразным или даже необходимым могло бы быть установление цены на углерод, чтобы чистый водород смог конкурировать с «серым» вариантом и, в конечном итоге, с ископаемыми видами топлива. В этом смысле водород может оказаться вовлечённым в более масштабные торговые углеродные войны. Например, строгое регулирование утечек метана на этапе разведки и добычи могло бы вызвать трения между производителями «синего» водорода и регионами-импортёрами, желающими получать чистый водород. Механизмы углеродных пограничных корректировок (подобные предложенному Европейский союзом) могли бы вызвать международные трения, поскольку они могут отрицательно сказаться на подверженных торговым рискам углеродоёмких отраслях в странах вне ЕС.<sup>30</sup>

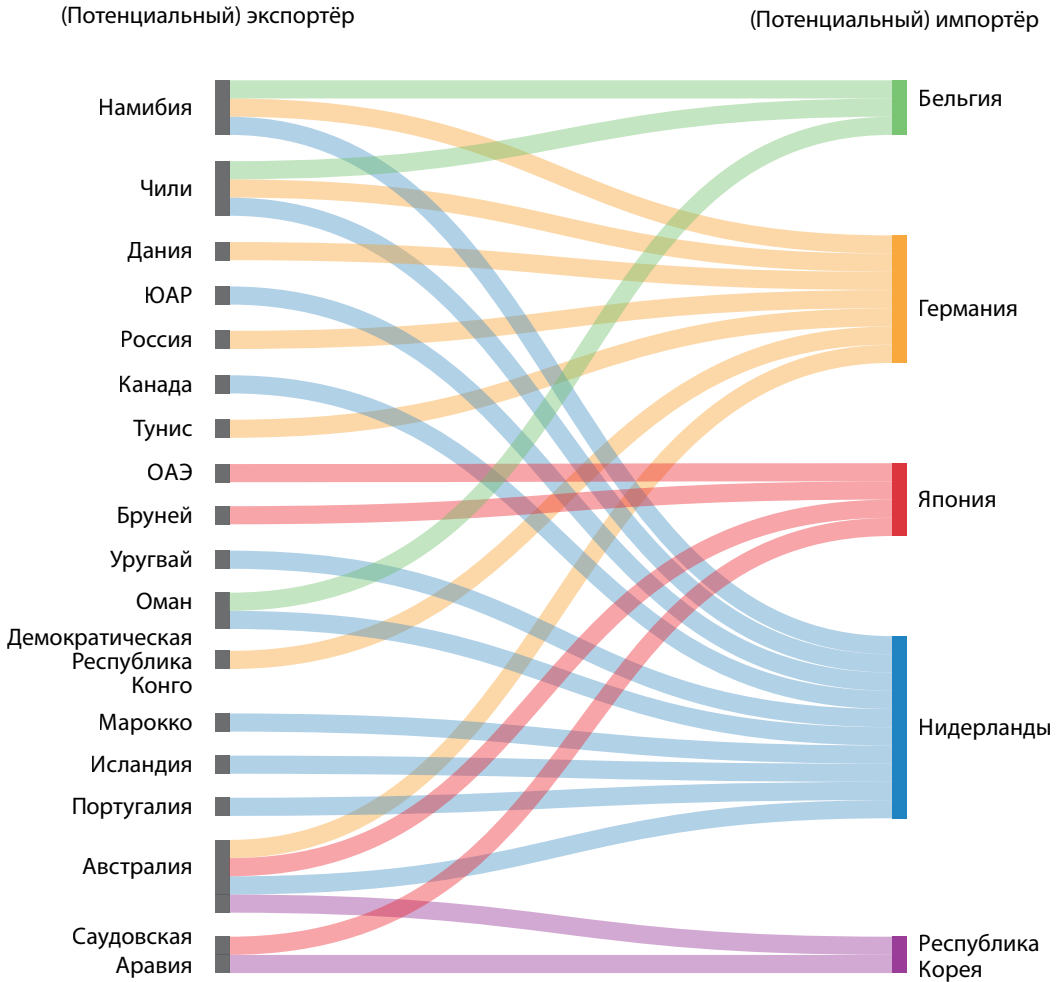
### 4.3 ВОДОРОДНАЯ ДИПЛОМАТИЯ

Как и в начале развития отрасли сжиженного природного газа (СПГ), многие правительства заключают двусторонние сделки и соглашения о строительстве и эксплуатации инфраструктуры для содействия трансграничной торговле водородом. Среди таких договорённостей — технико-экономические обоснования, письма о намерениях, протоколы о намерениях, партнёрства в сфере энергетики и даже пробные поставки. Несколько стран, в том числе Канада, Чили, Германия, Италия, Япония и Испания, в своих национальных стратегиях прямо упоминают возможность двусторонних отношений в сфере торговли водородом. Со временем такие формирующиеся договорённости и стратегии могут уступить место новым торговым отношениям в сфере энергетики, новым морским путям сообщения и новым торговым маршрутам (рисунок 4.5).

29 Компания S&P Global Platts уже разработала справочные цены для электролитического и газового водорода (без улавливания и хранения) в шести разных странах. На данный момент справочные цены указаны как в евро, так и в долларах США (S&P Global, без даты). После такого первого шага по созданию рынка обычно появляются двусторонние соглашения или региональные рынки, а затем формируется более масштабный и более ликвидный рынок (den Ouden, 2020). Подобным же образом, Европейская энергетическая биржа в 2022 г. также планирует запустить индекс цен, который будет отражать состояние внебиржевого рынка ценных бумаг и двусторонней торговли, регулируемой импортными и экспортными соглашениями (Reuters, 2021). Такой индекс будет выражен в евро.

30 Первоначальное предложение Европейского союза относится к импорту аммиака и электроэнергии, но не к водороду <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0564>.

**Рисунок 4.5** Отдельные двусторонние торговые соглашения и протоколы о намерениях между странами, о которых объявлено по состоянию на ноябрь 2021 г.



Примечание: рисунок относится только к торговым соглашениям по водороду, он основан на официальных объявлениях и не является исчерпывающим. Он не отражает частные соглашения и соглашения, предметом которых является исключительно сотрудничество в сфере технологий. ПОН = протокол о намерениях.

Некоторые такие формирующиеся двусторонние сделки по водороду заключаются странами с уже налаженными торговыми энергетическими отношениями. Например, Япония уже импортирует нефть-сырец из Саудовской Аравии. Обе страны сейчас рассматривают возможность расширения своих торговых отношений и включения в них «синего» аммиака. Однако другие двусторонние сделки не совпадают с существующими энергетическими торговыми потоками. Это относится, например, к двусторонним сделкам и переговорам между Германией и Марокко, Намибией и Нидерландами, а также Новой Зеландией и Республикой Корея, в том числе. Будут ли реализованы все эти маршруты торговли водородом — ещё предстоит выяснить, но можно говорить о возможности появления абсолютно новой карты геополитики в энергетической сфере.

Некоторые страны, рассчитывающие импортировать водород и сопутствующие безуглеродные виды топлива, уже участвуют в водородной дипломатии (вставка 4.2). Германия и Япония являются пионерами в налаживании новых торговых отношений в сфере водорода, но и другие страны идут по этому же пути. В ряде стран водородная дипломатия вполне может стать стандартным пунктом экономической дипломатии.

#### 4.4 ИЗМЕНЕНИЯ В ПОЛИТИЧЕСКИХ ОТНОШЕНИЯХ

Торговые и инвестиционные отношения между странами переплетаются с более широкими политическими вопросами. Поскольку изменения в экономических отношениях могут влиять на политические связи (и наоборот), появление рынков водорода и других чистых видов топлива способно привести к изменениям в политических отношениях и альянсах между странами.

Торговые отношения на рынках нефти и газа в значительной степени формировались под влиянием геологии: запасы углеводородов сконцентрированы в ограниченном количестве стран. В то же время 80% людей в мире живёт в странах, которые являются чистыми импортёрами ископаемых видов топлива (IRENA, 2019a). С другой стороны, у каждой страны есть возобновляемые источники энергии, хотя сила ветра и степень освещённости от солнечного излучения в разных странах варьируются, а другие возобновляемые ресурсы, например, гидроэнергия или геотермальная энергия, преобладают в тех или иных странах. Поскольку возобновляемая энергия распространена повсеместно, страны могут получить гибкость выбора предпочтительных торговых партнёров на рынках чистого топлива будущего (Grimm and Westphal, 2021). Однако способность стран превращать потенциал возобновляемых источников в производство энергии зависит от их промышленных мощностей и от прав интеллектуальной собственности, которые служат основой для инноваций в секторе возобновляемой энергетики. Такие мощности относительно сконцентрированы в нескольких странах. Как следствие, большинство стран зависит от импорта фотоэлектрических панелей, ветровых турбин и другого оборудования из относительно небольшого ряда стран. Поэтому торговые отношения в сфере возобновляемой энергетики в большой степени формируются национальной промышленной политикой.



©ake1150sb/istockphoto.com



©nd3000/istockphoto.com



## ВСТАВКА 4.2 ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВОДОРОДНОЙ ДИПЛОМАТИИ

Несколько стран уже предпринимает дипломатические шаги для продвижения своих стратегий в сфере водорода.

**Германия** заключила двусторонние сделки по водороду с самыми разными потенциальными странами-поставщиками, включая Австралию, Чили, Марокко, Намибию, Тунис и Украину. Федеральное министерство иностранных дел Германии открывает специальные представительства по вопросам сотрудничества в области водородной энергетики при своих посольствах в Луанде (Ангола), Абудже (Нигерия), Москве (Россия), Эр-Рияде (Саудовская Аравия) и Киеве (Украина). Посредством таких новых представительств Германия намерена поддерживать международный диалог о геополитических последствиях глобального рынка водорода. Кроме того, Германия выделила около миллиарда евро фонду H2Global Foundation — органу, учреждённому шестнадцатью крупнейшими немецкими промышленными компаниями с целью стимулирования быстрого роста рынка «зелёного» водорода и его производных. Задача фонда H2Global Foundation — покупать «зелёный» водород или производные водорода за границей и перепродавать эти продукты на ежегодных аукционах. Средства будут использоваться для покрытия разницы между ценами покупки и внутренними ценами продажи производных водорода.<sup>31</sup>

**Японские** дипломаты и заинтересованные промышленные круги привлекают Австралию, Бруней, Норвегию, Саудовскую Аравию и другие страны к созданию производственно-сбытовых цепочек для торговли водородом. Международная водородная стратегия Японии нацелена на обеспечение новых потоков импорта «зелёных» видов топлива, чтобы они конкурировали с СПГ в производстве электроэнергии и с бензином на транспорте. Ещё одна цель Японии — продавать свои низкоуглеродные технологии и ноу-хау за рубеж (Nagashima, 2018).

Другие страны идут по тому же пути. **Нидерланды** стали первой страной, которая назначила специального «водородного посланника» (2019-2021 гг.). В качестве потенциальных поставщиков голландское правительство рассматривает, среди прочих стран, Чили, Намибию, Португалию и Уругвай. **Республика Корея** заключила соглашения с Саудовской Аравией и Новой Зеландией. Промышленные предприятия в **Бельгии** рассматривают Чили, Намибию и Оман в качестве потенциальных поставщиков больших объёмов водорода, а **Сингапур** изучает целесообразность маршрутов поставок водорода из Латинской Америки. Эти намечающиеся двусторонние сделки являются частью глобальной конкуренции за лучшие места для производства водорода (Radowitz, 2021).

Водородная дипломатия работает в обе стороны: экспортёры также ищут и находят потенциальных покупателей. Например, в национальной водородной стратегии **Чили** упоминается, что эта страна будет использовать «дипломатию в отношении «зелёного» водорода» для глобального позиционирования себя в качестве источника чистых видов топлива и энергоносителей. В ней говорится, что Чили будет эффективно использовать своё участие на международных платформах и свои «дипломатические отношения с 171 государством» для раскрытия своего потенциала в сфере экспорта водорода, а также привлечения иностранных инвестиций (Министерство энергетики Чили, 2020a). В 2020 г. эта страна стала местом проведения саммита по водороду (Министерство энергетики Чили, 2020b), и её примеру в 2021 г. последовал **Оман** — ещё один потенциальный экспортёр.<sup>32</sup>

31 Основанный на аукционах механизм согласует предложение и спрос с помощью создания посредника — компании Hydrogen Intermediary Company, которая заключает долгосрочные контракты на покупку на стороне предложения и краткосрочные контракты на продажу на стороне спроса. Средства, выделяемые Федеральным правительством, будут использоваться для закрытия разрыва между целевой и ожидаемой себестоимостью. С помощью фонда H2Global операторы и инвесторы получают гарантии в отношении планирования и инвестиций, необходимые для наращивания масштабных мощностей в сфере электролиза, поскольку они могут строить свой бизнес и финансовую модель, опираясь на долгосрочные соглашения о закупках, заключённые с платёжеспособным контрагентом по ценам, отражающим затраты (BMW, 2021).

32 [www.greenhydrogensummitoman.com/index.php](http://www.greenhydrogensummitoman.com/index.php)

Кроме того, корпоративные стратегии нацелены на выбор определённых стран в качестве региональных или глобальных центров снабжения.

Торговые водородные потоки также могут стать источником новых стратегических планов. По мере того, как некоторые страны и регионы начнут импортировать водород в больших количествах, стратегическая важность стран-экспортёров будет расти. Кроме того, новые центры производства водорода и транспортные маршруты будут служить источником стратегических данных для организаций, обеспечивающих безопасность и защиту.

Будут появляться возможности для влияния на зарождающийся водородный рынок с целью продвижения устойчивого развития. Например, Германия, уже привлекла несколько африканских стран к исследованию и развитию водородной экономики, которая будет использовать ресурсный потенциал этого континента для поддержки его устойчивого экономического развития (H2Atlas, 2021).

Из множества стран мира с благоприятными условиями для производства дешёвого чистого водорода потенциальные импортёры могут выбрать те, с которыми у них уже налажены прочные связи. Они также могут использовать свой спрос на чистый водород для создания новых альянсов. Фактор географии останется, не каждая страна способна производить дешёвый водород на экспорт, а транспортные затраты на большие расстояния, вероятно, останутся высокими. У некоторых стран просто не хватает соответствующих ресурсов (потенциальных возобновляемых источников, пространства, земли, достаточных водных ресурсов и т.д.), а другие страны находятся вдали от крупных центров спроса.

В этих условиях поддержка развития водородных отраслей в развивающихся странах с большим потенциалом может обеспечить достижение нескольких целей. Поскольку не все страны в равной степени способны развить свой потенциал в области возобновляемых ресурсов в нужном масштабе и по конкурентным ценам, и не у всех есть равный доступ к технологиям, которые всё ещё сосредоточены в ограниченном числе стран, установление отношений для торговли водородом могло бы способствовать сотрудничеству по вопросам доступа к технологиям, знаниям и капиталу. Это могло бы открыть новые возможности для партнёрства в сфере налаживания местных производственно-сбытовых цепочек, стимулирования отраслей и создания рабочих мест в странах, богатых возобновляемыми источниками энергии. Таким образом, чистый водород также может стать инструментом для достижения большей справедливости.

Растущий интерес к чистому водороду способствует созданию международных партнёрств и сетей. По всему миру уже появляются новые альянсы в форме многосторонних партнёрств и промышленных альянсов (Ghosh and Chhabra, 2021). В более долгосрочной перспективе, по мере изменения энергетических торговых потоков будут меняться и партнёрства в сфере безопасности. То, как сланцевая революция в США способствовала частичному уходу этой страны с Ближнего Востока, может помочь предсказать некоторые изменения в результате наступления чистого водорода. Например, ключевые маршруты транзита нефти, такие как Ормузский пролив, могут стать менее значимыми для глобальной энергетической безопасности, даже если они будут и дальше использоваться для транспортировки чистого водорода, аммиака и других видов топлива из Персидского залива и с Ближнего Востока в целом.





#### 4.5 ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Водород часто рассматривался как потенциальное средство для решения проблем, связанных с энергобезопасностью. Резкие изменения цен на нефть в 70-х годах прошлого века и пиковые цены на неё в начале 2000-х гг. стояли за предыдущими волнами интереса к водороду — и на это имелись все основания. Чистый водород может повысить энергобезопасность тремя основными способами: 1) путём снижения зависимости от импорта, 2) путём смягчения волатильности цен, и 3) путём повышения гибкости и стойкости энергетической системы. Большинство таких преимуществ связаны с «зелёным», а не с «синим» водородом. И многие из них появляются лишь при условии развития рынка.

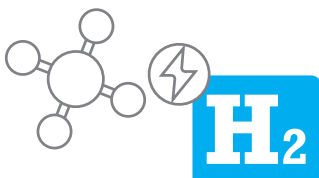
Энергобезопасность означает не только наличие и ценовую доступность ресурса, но и его устойчивость и справедливое распределение. Например, схемы импорта возобновляемого водорода из стран, где у большинства населения нет доступа к электроэнергии или где энергосеть всё ещё сильно зависит от ископаемых видов топлива, могут повысить энергетическую безопасность стран-импортёров, но их вряд ли можно назвать «зелёными» или «устойчивыми». В главе 5 более подробно рассматриваются характеристики устойчивости водорода.

Кроме того, энергетическую безопасность необходимо рассматривать в контексте физически ощутимых последствий изменения климата. Это серьёзный вопрос, так как энергетическая инфраструктура становится всё более уязвимой к изменению климата. Например, согласно оценкам, половина заводов по производству СПГ в мире подвержена «очень высокому риску» воздействия разрушительных циклонов, а порядка 35% нефтеперерабатывающих заводов расположено в зонах высокого риска. Множество заводов СПГ и НПЗ в мире находится в прибрежных районах, подверженных серьёзному риску сильных штормовых ветров и прибрежных наводнений (МЭА, 2021f). Хотя водород может способствовать топливному разнообразию и стойкости системы, водородные объекты, особенно расположенные в низинных прибрежных районах, также могут быть уязвимы к последствиям изменения климата, включая штормы, наводнения и засухи.

### Уменьшение зависимости от импорта

Водород может снизить зависимость от импорта энергоресурсов путём замены импортируемых ресурсов внутренними источниками. Если для производства водорода задействовать местную энергию ветра, солнца, воды, биомассы и геотермальных источников, можно повысить энергетическую безопасность страны в той степени, в которой будет замещаться импортируемое топливо. Такой шаг мог бы помочь отделить внутреннее энергопотребление от непредсказуемости мировых рынков и снизить расходы страны на импорт энергии (Steinberger-Wilckens *et al.*, 2017). Согласно сценарию агентства IRENA по ограничению глобального потепления 1,5 °C, в 2050 г. две трети производимого «зелёного» водорода будет использоваться на месте, а не продаваться в другие страны (IRENA, ещё не опубликовано-а).

Если для производства водорода в качестве сырья будет использоваться природный газ, это может привести к сохранению или даже росту импорта природного газа. Недобывающие страны, которые решат производить водород из природного газа, могут в конечном итоге прийти к тому, что будут импортировать столько же природного газа по трубопроводам или через терминалы СПГ, сколько и раньше.<sup>33</sup> Конечно, экспортёры газа могут переключиться на экспорт «синего» водорода напрямую. С точки зрения стран-импортёров, ни один из этих способов существенно не изменит степень их энергетической безопасности. Существующая зависимость от импорта может сохраниться или вырасти из-за продолжения зависимости от товара, подверженного геополитическим и рыночным колебаниям.



<sup>33</sup> Использование импортируемого природного газа для производства водорода также может привести к возникновению обратного торгового потока CO<sub>2</sub> и необходимости его возврата для хранения в выработанных газовых (или нефтяных) месторождениях, что ещё больше усложнит производственно-сбытовую цепочку. См., например, проект LPG-for-CO<sub>2</sub>, реализуемый Саудовской Аравией и Республикой Корея, или проект H2morrow, в котором участвуют норвежская энергетическая компания Equinor, крупнейший немецкий оператор газопроводов OGE и немецкий производитель стали Thyssenkrupp (Ratcliffe, Kim and Park, 2021; Open Grid Europe, 2021).

### Смягчение волатильности цен

Возобновляемый водород может защитить крупных промышленных покупателей от нестабильности цен на ископаемые виды топлива. Общеизвестно, что рынки ископаемых видов топлива цикличны, и цены могут сильно колебаться в разные периоды времени. Такие риски проявили себя осенью и зимой 2021 г., когда цены на газ (и в меньшей степени на электроэнергию) на разных рынках мира выросли до рекордных величин, вынудив энергоёмкие отрасли, например, заводы по выпуску удобрений, временно сократить объёмы своего производства (Paulsson and Durisin, 2021).

В то же время, электроэнергия, вырабатываемая на основе возобновляемых источников энергии, всё чаще приобретается по долгосрочным соглашениям о закупках электроэнергии (СЗЭ) с ценами, устанавливаемыми на конкурсной основе путём проведения аукционов. В зависимости от выбранной стратегии, участники аукциона могут решить взять на себя риски колебаний на товарных рынках, отложив подписание соглашения о закупках с поставщиками компонентов и оборудования, или передать такой риск поставщикам, подписав соглашение в момент проведения аукциона. До сих пор сокращение затрат благодаря накопленному опыту, усовершенствованию технологического и производственного процесса, а также экономии масштаба было более значительным, чем колебания товарных цен. По этой причине, участники аукционов обычно размещали свои заявки в ожидании снижения затрат и повышения маржи прибыли, что означало, что они также брали на себя этот риск.<sup>34</sup> Благодаря этому, СЗЭ являются привлекательным способом уменьшить риск волатильности цен на топливо, возникающей не только из-за колебаний на товарном рынке, но и в результате конфликтов, непредвиденных происшествий и по другим причинам. Поэтому расширение структуры топливного баланса с помощью «зелёного» водорода могло бы способствовать ценовой стабильности в таких отраслях, как производство удобрений, авиация и морские перевозки.

При этом колебания цен на ископаемые виды топлива частично обусловлены инвестиционными циклами в отрасли, которые иногда приводят к несоответствию предложения и спроса. Это будет происходить и с производством «зелёного» водорода или аммиака, с их капитальными активами и высокой капиталоемкостью. В случае недостаточности поставок «зелёного» водорода для наращивания производственных мощностей потребуется некоторое время.



<sup>34</sup> Аукционы отличаются гибкостью своего механизма и могут быть адаптированы для передачи рисков различным участникам рынка в зависимости от конкретных условий и целей страны.

### Повышение гибкости и стойкости

Водород также способен обеспечить гибкость и стойкость энергетической системе, которую в ближайшие десятилетия ожидает масштабная электрификация. Для определения лучших способов освоения водорода требуется тщательное планирование. Например, электролизёры можно использовать в тех случаях, когда большая доля энергии производится из переменных возобновляемых источников энергии, а излишки электроэнергии невозможно передавать по линиям электропередачи или хранить в аккумуляторах (например, на севере Чили или в Северном море для морских ветровых установок) (IRENA, 2021b). Хотя целевые показатели по электролизу внутри страны и могут содействовать достижению целей энергобезопасности и промышленной политики, правительства не захотят жертвовать целями в области смягчения последствий изменения климата или отвлекать внимание от других приоритетных задач, например, обеспечения всеобщего доступа к энергии.

Настоящее конкурентное преимущество водорода заключается в его уникальной способности хранить энергию длительное время и в больших количествах. По мере вытеснения водородом ископаемых видов топлива в некоторых конечных сферах использования его хранение может постепенно приобрести исключительно важное значение для энергетической безопасности – точно такое же, как и хранение природного газа во многих регионах в настоящее время. Тем не менее, для хранения природного газа и водорода требуются разные условия. Природный газ хранят в основном для компенсации (сезонных) колебаний спроса. В отличие от этого, спрос на водород, вероятно, будет более постоянным, по крайней мере в первые годы расширения водородного рынка, когда основной спрос будет, скорее всего, со стороны промышленных предприятий (главным образом, сталелитейных и аммиачных заводов, а также высокорентабельных химических предприятий).<sup>35</sup>

Хранение водорода потребуется, главным образом, для смягчения колебаний предложения, а не спроса, так как «зелёный» водород производится с использованием переменных возобновляемых источников энергии. Это может обусловить размещение хранилищ водорода вблизи центров производства, а не спроса. Размещение и производства, и хранилищ в странах-экспортёрах может вызвать обеспокоенность, связанную с энергетической безопасностью, в странах-импортёрах без буферных мощностей для компенсации возможных перебоев в поставках. Конечно, точное расположение хранилищ будет зависеть от наличия подходящих подземных формаций.

Самым перспективным вариантом для длительного хранения водорода сейчас считаются соляные каверны.<sup>36</sup> Те из них, которые в настоящее время используются для хранения природного газа, могут быть переоборудованы для хранения чистого водорода. Однако, поскольку у водорода плотность энергии ниже, чем у природного газа, переоборудованное хранилище природного газа сможет вмещать только около 24% от первоначальных объёмов энергии (GIE and Guidehouse, 2021). Другими словами, для поддержания нынешней энергетической мощности хранилищ их объём нужно будет увеличить в четыре раза. Во всём мире сегодня водород хранится только в шести соляных кавернах, три из которых расположены в Тиссайде в Великобритании, и три — в штате Техас в США. Нарращивание подземного хранения водорода требует тщательного планирования, так как некоторые места хранения, вероятно, будут использоваться для хранения метана, биометана или даже CO<sub>2</sub> в переходный период и, возможно, в долгосрочной перспективе.

С помощью водорода можно также повысить самодостаточность удалённых поселений — от деревень, расположенных высоко в горах, до островов, находящихся вдали от материка. Такие поселения сталкиваются с уникальными проблемами энергетической безопасности. Нередко они сильно зависят от привозных ископаемых видов топлива, и их небольшие электросети часто полагаются на дизельные генераторы в качестве резервных источников питания. Однако у удалённых и островных поселений есть некоторые из лучших возобновляемых энергетических ресурсов в мире (IRENA, 2016a). И здесь тоже водород (часто в сочетании с аккумуляторами) может помочь с самодостаточностью. Например, на небольшом шотландском архипелаге Оркнейские острова энергия ветра и приливов преобразуется в водород с помощью двух водяных электролизёров. Затем водород используется для тепло- и электроснабжения местных школ, портовых зданий, а также нескольких паромов и транспортных средств на основе топливных элементов (FCH JU), без даты).

35 Использование водорода для отопления и генерации электроэнергии в пиковые периоды может добавить сезонности и изменчивости профилю спроса на водород, что усилило бы потребность в хранении.

36 Водород также можно хранить в подземных пластах других типов (водоносных горизонтах, пещерах в скальном грунте, выработанных нефтегазовых пластах), а также в надземных резервуарах для хранения, трубопроводах или ёмкостях (Caglayan *et al.*, 2020).



## 4.6 ТОРГОВЫЕ РИСКИ И УЯЗВИМОСТИ

Внедрение водорода в качестве энергоносителя может повысить риски энергетической безопасности, особенно, когда речь идёт о международной торговле водородом и его производными. Предполагается, что водород будет играть менее важную роль в декарбонизированной энергетической системе в 2050 г. по сравнению с ископаемыми видами топлива сегодня. Поэтому уровень торгового риска будет ограничен небольшим числом отраслей. В данном разделе рассматриваются три возможные уязвимости в глобальных производственно-сбытовых цепочках водорода: 1) инвестиционный риск страны, 2) технические неисправности и политические потрясения, и 3) доступ к критически важному сырью для технологий, связанных с водородом.

### Инвестиционный риск

Создание инфраструктуры для торговли водородом сопряжено с рисками на обоих концах цепочки поставок. Учитывая высокую капиталоемкость производственно-сбытовых цепочек для водорода, чтобы уменьшить риски для таких инвестиций, вероятно, потребуются крупные консорциумы, активное участие государства и международная координация. В этом отношении история рынка СПГ может быть познавательной, что продемонстрировано во вставке 4.3.

Для экспортёра самым важным условием является обеспечение доходных поступлений. Без гарантированных потоков выручки будет невозможно возместить начальные капитальные затраты, понесённые при строительстве водородных проектов. Выручка должна быть достаточной, чтобы покрыть затраты на электролизёры (в случае «зелёного» водорода), установки риформинга природного газа (в случае «синего» водорода), солнечные и ветровые электростанции (для «зелёного» водорода), инфраструктуру для запасов газа (для «синего» водорода) и инфраструктуру для транспортировки и хранения.

Планы по проектам экспорта водорода возникли в Австралии, на Ближнем Востоке, в Северной и Южной Африке и Южной Америке. В целом в рамках данных проектов планируется производить миллионы тонн чистого водорода и производных продуктов для поставки на мировые рынки. Будущее этих планов неясно, так как глобальный спрос на чистый водород только начинает формироваться и конкуренция за сбыт будет очень напряжённой. Перечень стран, желающих стать экспортёрами водорода, гораздо длиннее, чем список стран, планирующих импорт этого ресурса.

С точки зрения покупателей, готовящихся зависеть от импорта, принципиально важное условие – надёжность поставок. Покупатели должны быть уверены в наличии достаточных мощностей возобновляемой электроэнергии для электролиза в странах-экспортёрах водорода. Несколько потенциальных экспортёров водорода находятся в условиях растущего внутреннего спроса на электроэнергию. Рассмотрим Ближний Восток и Северную Африку, которые часто считают потенциальными поставщиками водорода и его производных. Согласно прогнозам, в период с настоящего момента до 2050 г. население этого региона вырастет вдвое (ООН, 2019). Как следствие, также ожидается резкий рост спроса на электроэнергию. Такая ситуация ставит высокие требования к возобновляемым источникам энергии, которые должны будут одновременно удовлетворять растущий спрос на электроэнергию, заменять нынешние генерирующие установки, работающие на ископаемых видах топлива, и снабжать электроэнергией электролизёры для производства водорода на экспорт.





Также энергетической безопасности угрожает неопределённость в сфере инвестиций. Хотя и было объявлено о многих гигаваттных проектах по экспорту водорода, их реализация может быть отложена по ряду причин, в том числе из-за разрешительных процедур. Например, в июне 2021 г. правительство Австралии отклонило по экологическим соображениям план строительства крупнейшего в мире производства по экспорту «зелёного» водорода — так называемого Азиатского центра возобновляемых источников энергии (Smyth, 2021).

Более высокие инвестиционные риски обуславливают более высокие общие затраты на проектное финансирование, однако они не обязательно препятствуют инвестициям. Добывающий нефтегазовый сектор демонстрирует, что при условии ясных доходов инвестиции будут поступать даже в страны с высокими рисками. Например, в мае 2021 г. австралийский разработчик систем возобновляемой энергии подписал протокол о намерениях на сумму 40 млрд долл. США с правительством Мавритании по строительству одного из крупнейших в мире проектов по «зелёному» водороду (рисунок 4.6). Соглашение было подписано даже несмотря на то, что Мавритания также получила отметку о повышении уровня нестабильности в перечне уязвимых государств (Фонд мира, 2021).

### **ВСТАВКА 4.3**

#### **УМЕНЬШЕНИЕ РИСКА, СВЯЗАННОГО С ОБЪЁМАМИ И ЦЕНАМИ, В ТОРГОВЛЕ ВОДОРОДОМ: УРОКИ, УСВОЕННЫЕ НА ПРИМЕРЕ РАЗВИТИЯ РЫНКА СПГ**

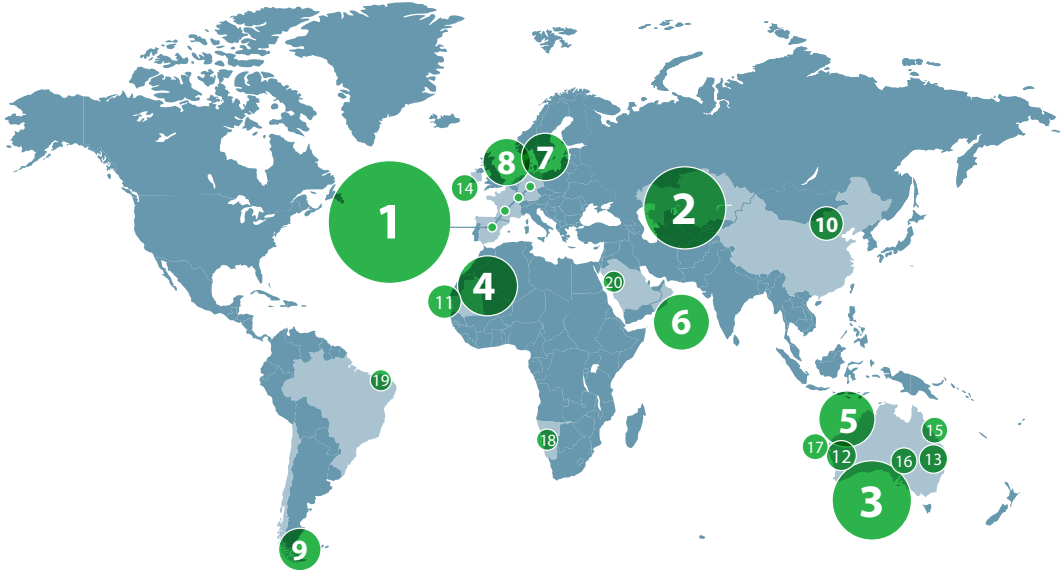
На заре своего развития отрасль сжиженного природного газа (СПГ) столкнулась с той же дилеммой, которая стоит перед экспортёрами водорода сегодня: как смягчить ценовой риск для экспортёров и риск объёмов для покупателей. Первые поставки на тех рынках осуществлялись гарантированным покупателям в соответствии с двусторонними долгосрочными контрактами (двадцать лет или больше) с тремя ключевыми характеристиками (Секретариат Энергетической Хартии, 2007).

Во-первых, в них содержались положения «бери или плати», согласно которым покупатели должны были оплатить минимальную часть объёма природного газа, независимо от того, действительно ли они нуждались в ней или нет. Во-вторых, в таких контрактах использовалась система ценообразования по принципу замещения стоимости, согласно которой цена СПГ была основана не на стоимости производства, транспортировки, марже прибыли и т.д., а была привязана к цене конкурирующих видов топлива (обычно нефти). В-третьих, такие контракты включали в себя положения о пункте назначения, которые не позволяли покупателю перепродавать закупленный СПГ третьим сторонам.

Как следствие, первые торговые маршруты для СПГ часто называли «плавающими трубопроводами», так как для осуществления таких поставок использовались специальные танкеры, курсировавшие между назначенными терминалами экспорта и импорта СПГ. Такой подход позволял распределить риск; он устранял озабоченность покупателя СПГ в отношении безопасности поставок, одновременно обеспечивая приемлемый доход от инвестиций для продавца СПГ. В последние годы торговля СПГ стала гораздо более гибкой, с увеличением числа краткосрочных контрактов и ростом спотовой торговли.

Япония выступила в роли пионера при создании рынка торговли СПГ. С момента первых импортных поставок СПГ из Аляски в 1969 г. Япония была крупнейшим покупателем топлива (до тех пор, пока её не обошёл Китай в первой половине 2021 г.) и сформировала структуру рынка СПГ. Индексация цен к так называемой японской нефтяной смеси (Japan crude cocktail) стала стандартным элементом азиатского рынка СПГ – безоговорочно крупнейшего регионального рынка СПГ (Koyama, 2021).

**Рисунок 4.6** Двадцать крупнейших в мире объявленных проектов исключительного масштаба в области «зелёного» водорода



- 1 **HyDeal Ambition (67 ГВт)** ..... Западная Европа
- 2 **Без названия (30 ГВт)** ..... Казахстан
- 3 **Western Green Energy Hub (28 ГВт)** ..... Австралия
- 4 **AMAN (16 ГВт)<sup>а</sup>** ..... Мавритания
- 5 **Asian Renewable Energy Hub (14 ГВт)** .... Австралия
- 6 **Oman Green Energy Hub (14 ГВт)<sup>а</sup>** ..... Оман
- 7 **AquaVentus (10 ГВт)** ..... Германия
- 8 **NorthH2 (10 ГВт)** ..... Нидерланды
- 9 **H2 Magallanes (8 ГВт)** ..... Чили
- 10 **Beijing Jingneng (5 ГВт)** ..... Китай
- 11 **Project Nour (5 ГВт)<sup>а</sup>** ..... Мавритания
- 12 **HyEnergy Zero Carbon Hydrogen (4 ГВт)<sup>а</sup>** Австралия
- 13 **Pacific solar Hydrogen (3,6 ГВт)** ..... Австралия
- 14 **Green Marlin (3,2 ГВт)** ..... Ирландия
- 15 **H2-Hub Gladstone (3 ГВт)** ..... Австралия
- 16 **Moolawatana Renewable Hydrogen Project (3 ГВт)<sup>а</sup>** — Австралия
- 17 **Murchison Renewable Hydrogen Project (3 ГВт)** — Австралия
- 18 **Проект без названия (3 ГВт)** ..... Намибия
- 19 **Base One (2 ГВт)<sup>а</sup>** ..... Бразилия
- 20 **Helios green Fuels Project (2 ГВт)** ..... Саудовская Аравия

Примечание: размер относится к мощности электролизёров. Информация основана на объявленных планах.

а. Расчётная мощность электролизёров на основе сравнения со схемами подобного же размера.

Отказ от ответственности: данная карта приведена исключительно в целях наглядности. Показанные на карте границы не подразумевают какую-либо поддержку или принятие их агентством IRENA. Источник карты: Natural Earth, 2021 г.

Степень риска, который готов взять на себя иностранный инвестор, ограничена. У стран с нестабильной ситуацией может быть наилучший потенциал в отношении водорода и его производных (Ram *et al.*, 2020), но они вряд ли смогут задействовать этот потенциал в ближайшем будущем из-за огромных рисков для ведения бизнеса в их хрупкой политической обстановке и условиях отсутствия безопасности.

### **Технические неисправности и политические потрясения**

У перебоев с поставками энергии могут быть разные причины: технические сбои (неисправности оборудования или инфраструктуры), человеческий фактор (ошибки, аварии или злонамеренные действия) или природные факторы (ураганы, землетрясения или наводнения). Такие сбои могут иметь более серьёзные последствия в случае водородной инфраструктуры, так как водород отличается уникальными характеристиками, из-за которых при обращении с ним требуется соблюдать особые правила безопасности.<sup>37</sup> Однако связанные с водородом риски безопасности хорошо известны, и для их уменьшения можно применять национальные и международные стандарты, протоколы и меры.

Другой вид сбоев возникает, когда государства в геостратегических целях пытаются использовать торговлю энергоресурсами и взаимозависимость в качестве инструмента давления. В истории есть много примеров, когда государства манипулировали энергетическими потоками (бойкоты экспорта или запреты на импорт), ценами на энергию (предоставление скидок союзникам) или энергетической инфраструктурой (строительство новых нефтяных и газовых трубопроводов) для достижения своих внешнеполитических целей (Van de Graaf and Sovacool, 2020). Большинство таких примеров «государственной позиции в энергетике» связано с сырой нефтью и природным газом.

Нельзя исключать того, что в будущем экспорт и импорт водорода может успешно использоваться в качестве инструмента политического шантажа или принуждения. Предпосылкой для «государственной позиции в энергетике» является существование асимметричной независимости — расстановки сил, при которой в случае разрыва отношений одна сторона гораздо более уязвима, чем другая сторона, которая, например, может быстро переключиться на других торговых партнёров или у которой есть значительные резервные запасы (аварийные запасы) (Keohane and Nye, 2001). На начальном этапе международной торговли водородом количество торговых партнёров будет ограничено, и обе стороны — и поставщик и покупатель — скорее всего, будут связаны двусторонними долгосрочными контрактами. Любое нарушение импорта или экспорта будет сильно ощущаться другой стороной ввиду вероятного отсутствия ликвидного рынка.

Однако вероятность появления водородного картеля, похожего на прежние альянсы в сфере ископаемых видов топлива, таких как картель «Семь сестёр», очень низка. Для существования эффективного картеля необходимо относительно небольшое количество производителей, контролирующих значительную долю рынка. Они должны быть способны устанавливать и обеспечивать соблюдение производственных квот, контроль расширения мощностей и ограничение доступа на рынок для новых производителей. Ещё одно условие — ограниченное число краткосрочных заменителей рассматриваемого продукта. Из-за отсутствия таких условий на газовом рынке картели не сформировались (Jaffe and Soligo, 2006). Ни одно из этих условий, скорее всего, не возникнет и в случае с водородом.

Водород можно производить во многих местах мира. Ведь это продукт производства, а не сырьевой материал или источник энергии. Благодаря этому невозможно помешать появлению новых участников в этой отрасли, а это было бы ключевым условием для образования картеля. Кроме того, многие страны заявили о своём желании стать экспортёрами водорода и получаемого из него топлива, что ограничивает вероятность концентрации экспорта.

---

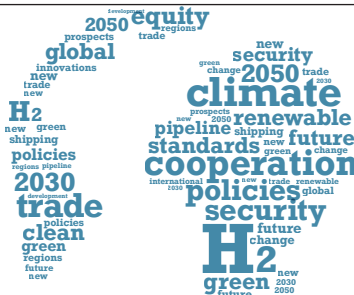
37 У водорода широкий диапазон легковоспламеняющихся концентраций, и некоторые полученные из водорода соединения могут представлять опасность для здоровья.

### Доступ к важнейшим сырьевым материалам

Для водородных технологий (и ряда других технологий возобновляемой энергии) требуется соответствующее сырьё, поэтому необходимо обсудить ещё одну тему — «материальную обеспеченность». Для топливных элементов и технологий хранения водорода используется порядка 30 сырьевых материалов (Европейская комиссия, 2020b). Хотя в настоящее время геологические поставки большинства минералов и металлов являются достаточными, рынки несомненно начнут сокращаться из-за быстрого роста спроса и долгих сроков реализации проектов по добыче и переработке. Тем временем могут появиться другие технологии, которые будут конкурировать с водородом за доступные объёмы важнейших материалов. Даже если страны способны производить собственный водород и таким образом повышать свою энергетическую независимость, они могут зависеть от ограниченного количества стран-поставщиков сырьевых материалов. Важнейшее значение для решения проблем, связанных с нехваткой минеральных ресурсов и металлов, будут иметь технологические инновации, энергоэффективность, а также концепции переработки и безотходной экономики.

Быстрое развитие сектора водорода станет толчком для роста спроса на никель и цирконий, которые используются в электролизёрах, и на металлы платиновой группы для топливных элементов (МЭА, 2021g). Поскольку освоение водорода приведёт к расширенному использованию технологий возобновляемых источников энергии, таких как солнечные и ветровые энергоустановки, а также прокладке новых электролиний и установке аккумуляторов, вырастет и спрос на минералы, используемые в таких технологиях.

Для различных типов электролизёров и топливных элементов требуются разные материалы. Производство преобладающих на сегодняшнем рынке щелочных электролизёров зависит от материалов (например, стали и никеля), по которым в целом не ожидается проблем с поставками (HyTechCycling, 2020). Для сравнения, производство электролизёров с твёрдоэлектролитной мембраной и твердооксидных электролизёров, вероятно, приведёт к более серьёзным проблемам зависимости от дефицитных материалов. Платина и иридий, используемые в электролизёрах с твёрдоэлектролитной мембраной, являются самыми редкими в мире металлами с высоким уровнем выбросов. Их добыча также сосредоточена в очень ограниченном количестве стран: на ЮАР приходится более 70% всех мировых поставок платины и более 85% мирового иридия (рисунок 4.7) (Minke *et al.*, 2021). В настоящее время замены для иридия нет и не предвидится (Kiemel *et al.*, 2021).



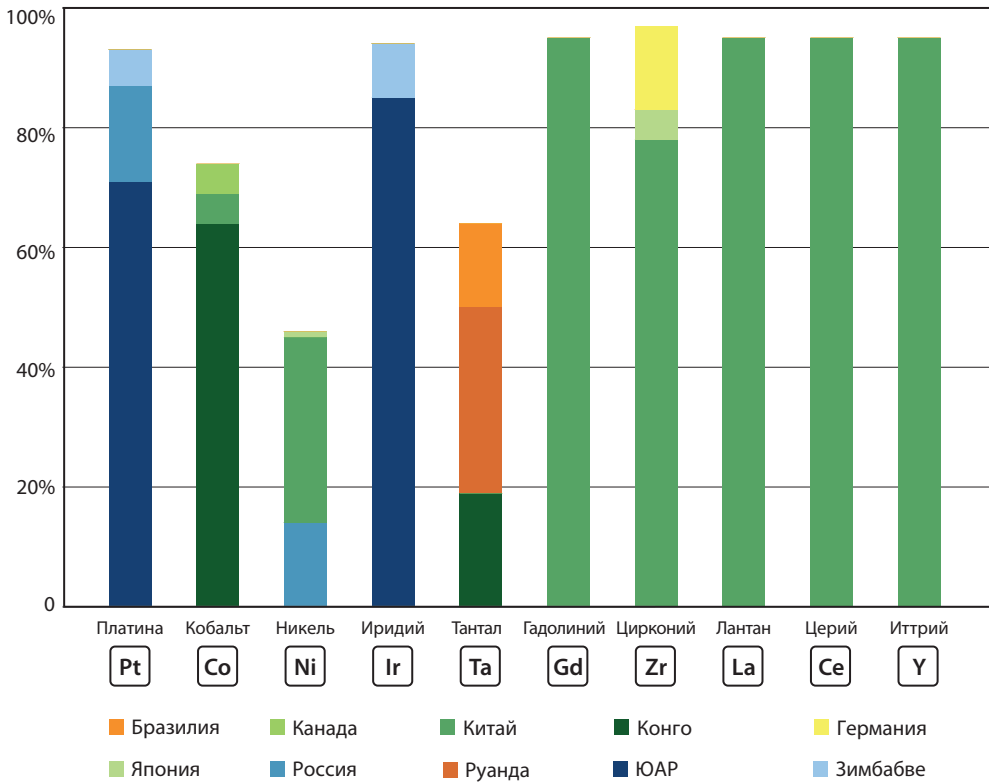
Одна из основных сфер использования платиновых металлов сегодня — автомобильная промышленность. В катализаторах двигателей внутреннего сгорания для сокращения выбросов диоксида серы и оксида азота используются три таких металла — платина, палладий и родий. По мере роста числа электромобилей с аккумуляторным питанием спрос на эти элементы сокращается. Для платиновой отрасли есть надежда, что расширение производства электролизёров с твёрдоэлектролитной мембраной и топливных элементов сможет компенсировать сокращение спроса на платину. В твердооксидных электролизёрах, которые сегодня используются в основном в лабораториях, но в перспективе станут настолько эффективными, что позволят сократить потребление электроэнергии, используются дефицитные материалы с ещё более высокой концентрацией поставок: более 95% таких материалов поступает исключительно из Китая (рисунок 4.7) (IRENA, 2020a). То же самое относится и к твердооксидным топливным элементам.

Важно отметить, что рынки многих таких материалов не являются ликвидными и неэластичны в краткосрочной перспективе. Это означает, что относительно небольшое изменение предложения и спроса способно привести к серьёзным колебаниям цен. Например, за последние 20 лет наблюдался следующий перепад цен: на платину — в 4 раза, на палладий — в 15 раз и на иридий — в 70 раз (Platinum Matthey, без даты). Такие колебания цен могут отразиться на всех звеньях цепочки поставки водорода и общей стоимости ключевых элементов оборудования, например, электролизёров, а также на доходах добывающих компаний и экспортёров сырья.



**Рисунок 4.7** Ведущие производители дефицитных материалов, применяемых в электролизёрах

Доля глобальных поставок добываемых материалов (%)



Источник: IRENA (2020a).



©Evgeny\_V/shutterstock.com

## ГЛАВА 5.

# ПЕРВОПРИЧИНЫ ГЕОПОЛИТИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ – И РОЛЬ ВОДОРОДА В РЕШЕНИИ ЭТОЙ ПРОБЛЕМЫ

В современном взаимосвязанном мире анализ геополитических изменений должен учитывать широкий и многомерный характер глобальных угроз и уязвимостей. Концепция «безопасности человека» часто используется для описания первопричин геополитической нестабильности. Выходя за рамки военных угроз безопасности государства, эта концепция расширяет повестку дня в сфере безопасности и охватывает такие нетрадиционные угрозы, как изменение климата, бедность и болезни, которые могут нарушить мир и стабильность внутри стран и между ними. Этот принцип, поддержанный Генеральной Ассамблеей ООН (2012 г.), задаёт направление работе ООН в сферах от миротворчества до гуманитарной помощи и устойчивого развития.

Семнадцать целей устойчивого развития (ЦУР) отражают многоплановый характер принципа «безопасности человека». В зависимости от способа освоения водород может иметь как положительные, так и отрицательные последствия для результатов устойчивого развития (рисунок 5.1).

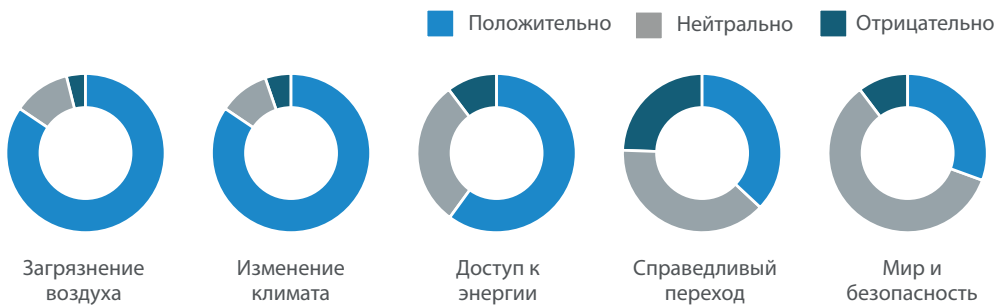


© Panchenko Vladimir/shutterstock.com

# 05



**Рисунок 5.1** Мнения экспертов о влиянии водорода на отдельные результаты устойчивого развития к 2050 г.



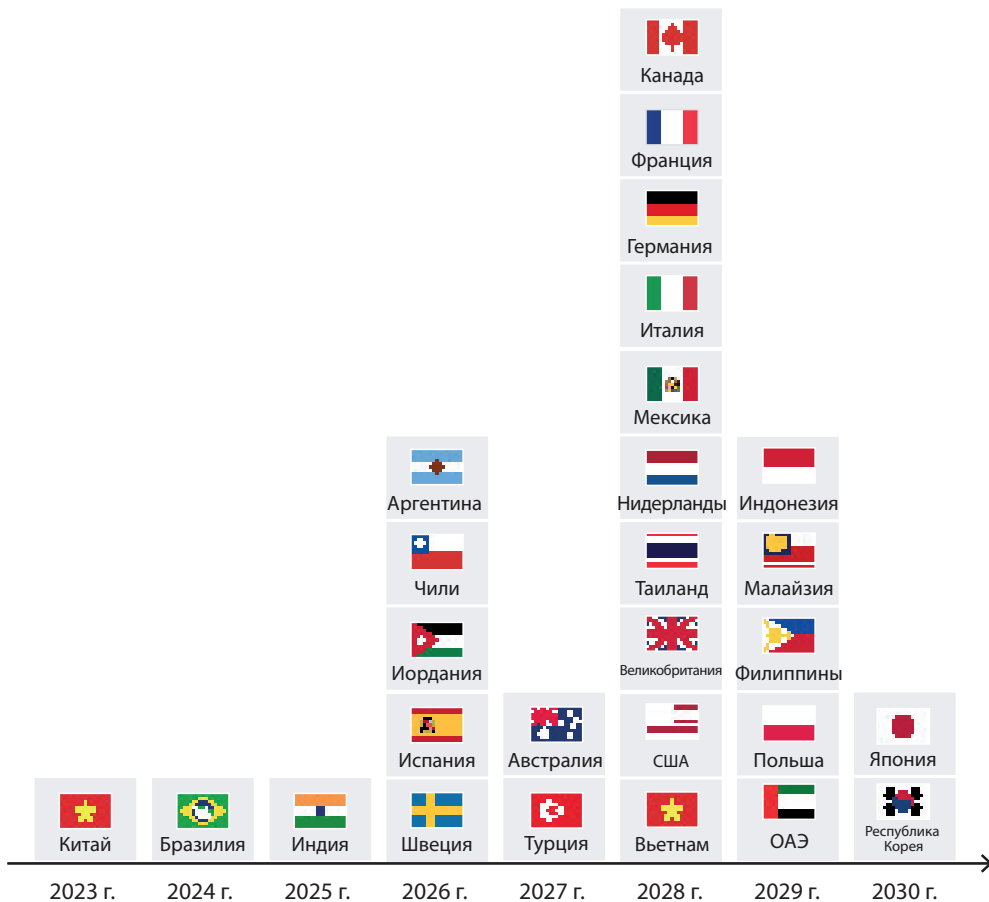
Источник: экспертное исследование агентства IRENA (вставка 2.2).

## 5.1 СОЦИАЛЬНО-ПОЛИТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Глобальный энергетический переход имеет социальные и экономические последствия, которые, в свою очередь, могут отразиться и на геополитической сфере. Чтобы энергетический переход был справедливым и инклюзивным, лица, ответственные за разработку политики, должны обращать внимание на влияние такого перехода на занятость и развитие промышленности, а также на включение в процесс всех сторон. С одной стороны, согласно прогнозу агентства IRENA, с 2030 года одни лишь электролизёры могут прямо подстегнуть создание 2 миллионов рабочих мест по всему миру, при том, что совокупная прогнозная численность рабочей силы к тому времени составит 137 миллионов человек (IRENA и ILO, 2021). С другой стороны, водород может нарушить деятельность определённых отраслей вследствие повышения риска незадействованных активов. Иногда «синий» водород позиционируется как беспроигрышный вариант, так как он позволяет странам-производителям монетизировать ресурсы и трубопроводы природного газа, которые в противном случае стали бы незадействованными активами. Но ожидаемое сокращение себестоимости «зелёного» водорода с одновременной более жёсткой политикой по климату означают, что инвестиции в цепочки поставок, основанные на ископаемых («синих» или «серых») видах топлива, могут стать незадействованными – особенно в активы, которые предполагалось использовать многие годы.

Согласно прогнозу агентства IRENA, к 2030 году «зелёный» водород обойдёт «синий» водород по издержкам (IRENA, 2020a). В некоторых странах это может произойти ещё быстрее, например, в Китае – благодаря наличию недорогих электролизёров, а также в Бразилии и Индии – благодаря их дешёвым возобновляемым ресурсам и сравнительно высоким ценам на газ (рисунок 5.2).

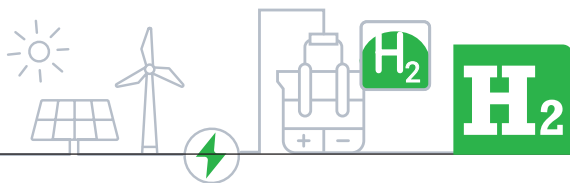
**Рисунок 5.2 Страны, в которых «зелёный» водород возможно может стать дешевле «синего» водорода, по годам**



Источник: BloombergNEF (2021 d).

Примечание: рисунок основан на оптимистичном сценарии себестоимости щелочных электролизёров, представленном Bloomberg New Energy Finance; сопоставимости мощностей возобновляемых ресурсов и электролизёров один к одному; и прогнозных средних ценах на газ на 20-летний период.

H<sub>2</sub>



Ещё один риск обесценивания активов вырисовывается в сегменте конечного потребления производственно-сбытовой цепочки водорода. Ожидается, что чистый водород будет играть важную роль в таких отраслях тяжёлой промышленности, как сталелитейная отрасль, цементная промышленность и производство химикатов. Эксплуатационный ресурс действующих предприятий в этих секторах обычно составляет 30–40 лет, при этом многие из них в течение этого срока проходят значительную модернизацию (IRENA, 2020b). Если новые предприятия и активы будут строиться с расчётом на ископаемые виды топлива, они гарантируют миллиарды тонн выбросов парниковых газов и рискуют стать ненужными на пути к достижению нулевых выбросов. До 2050 г. осталось совсем немного инвестиционных циклов, в связи с этим критически важно обеспечить готовность этих предприятий к будущему.

Для своевременного распространения «чистых» технологий, особенно для тяжёлой промышленности и транспорта, потребуются международное сотрудничество. Например, содействие развивающимся странам в реализации водородных проектов помогло бы избежать привязки к ископаемым видам топлива (вместо того, чтобы её создать). Со своей стороны, промышленно развитым странам было бы лучше заменять устаревающую инфраструктуру совместимыми решениями с нулевыми выбросами с расчётом на экономику будущего.

Кроме того, водород может стать частью комплекса мер по справедливому энергетическому переходу и содействовать развитию и преобразованию промышленности, в том числе, в энергоёмких промышленных зонах и портах. Например, испанская транснациональная электроэнергетическая компания Iberdrola приступила к строительству предприятия по производству «зелёного» водорода для промышленного использования в испанском городе Пуэртольяно, где раньше велась добыча угля (Iberdrola, без даты). Порт Роттердам (в настоящее время крупнейший хаб для ископаемых видов топлива) поставил перед собой стратегическую цель стать хабом для чистого водорода, подключившись к высоковольтным кабелям, идущим к морским ветряным установкам в Северном море, и установив новые торговые маршруты для импорта водорода и его производных (Администрация Порта Роттердам, 2020).



© Igor-Kardasov / istock.com

## 5.2 ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА, НЕХВАТКА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ОТСУТСТВИЕ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

### Риски безопасности, связанные с климатом

Уже более десяти лет изменение климата широко признаётся как потенциальный мультипликатор угроз, усугубляющий существующие причины конфликтов и уязвимости (Генеральная Ассамблея ООН, 2009). В докладе *A New Climate for Peace*, представленном в 2015 г. Большой семёркой (G7) (Adelphi et al., 2015), определяются семь комплексных рисков, связанных с неустойчивостью климата и представляющих серьёзную угрозу стабильности государств и обществ в ближайшие десятилетия (таблица 5.1). Они варьируются от роста конкуренции за местные ресурсы и колебаний цен на продовольствие до снижения надёжности доходов населения и миграции.

**Таблица 5.1 Семь угроз стабильности в результате изменения климата**

Угроза	Описание
<b>Местная конкуренция за ресурсы</b>	По мере роста давления на природные ресурсы и при отсутствии эффективного урегулирования споров конкуренция может привести к нестабильности и даже вооружённому конфликту.
<b>Ненадёжность источников дохода и миграция</b>	Изменение климата повысит уязвимость людей, зависящих от природных ресурсов в качестве источника их дохода, что может вынудить их к миграции или переходу на неофициальные или незаконные источники дохода.
<b>Экстремальные погодные явления и бедствия</b>	Экстремальные погодные явления и бедствия будут усугублять нестабильные ситуации и могут повышать уязвимость и недовольство людей, особенно в охваченных конфликтом странах.
<b>Колебания цен на продовольствие и нестабильные поставки</b>	Весьма вероятно, что изменение климата нарушит производство продовольствия во многих регионах, приведёт к росту цен и рыночным колебаниям и повысит риск протестов, беспорядков и гражданских конфликтов.
<b>Управление трансграничными водами</b>	Управление трансграничными водами часто является источником напряжённости. По мере роста спроса и влияния изменения климата на доступность и качество водных ресурсов, конкуренция за водопользование, вероятно, усилит давление на существующие структуры управления.
<b>Повышение уровня моря и деградация прибрежных районов</b>	Повышение уровня моря поставит под угрозу жизнеспособность низменных районов ещё до того, как они уйдут под воду; это приведёт к социальным потрясениям, вытеснению и миграции населения. Кроме того, могут возникнуть споры касательно морских границ и океанических ресурсов.
<b>Непредвиденные последствия политики в области климата</b>	По мере более широкого внедрения инструментов политики по адаптации к изменению климата и ослаблению его отрицательных воздействий также повысятся риски непредвиденных негативных последствий, в особенности в нестабильных условиях.

Источник: Adelphi et al. (2015).



Чистый водород будет критически важен для достижения глубокой декарбонизации и предотвращения стремительного изменения климата. Снижая угрозы, вызванные изменением климата, он может способствовать геополитической стабильности. Разработка надлежащих инструментов политики особенно актуальна в случае «синего» водорода, учитывая риски утечек метана и нехватку стандартов по уровню улавливания углекислого газа. При утечке в атмосферу газообразный водород может косвенно способствовать глобальному потеплению, так как он повышает уровни метана и озона — самых опасных парниковых газов после углекислого газа. Однако этот эффект не стоит преувеличивать. Согласно оценкам, потенциал водорода в отношении глобального потепления на период в 100 лет в четыре раза ниже, чем в случае метана.<sup>38</sup> Тем не менее, для отслеживания и контроля вклада водорода в усилия по смягчению последствий изменения климата будут крайне важны сертификаты происхождения, основанные на прозрачной и надёжной международной системе.

### Нехватка водных ресурсов

Нехватка водных ресурсов представляет собой прямую угрозу благосостоянию людей и окружающей среды. Кроме того, она может приводить к массовой миграции и вспышке конфликтов. Такие конфликты могут вспыхивать как локально, когда местные сообщества вынуждены конкурировать за скудные запасы пресной воды, так и на международном уровне в форме трансграничных конфликтов (Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН, 2020). Более 2 миллиардов людей живут в странах, испытывающих нехватку воды (ЮНЕСКО, 2021). Согласно прогнозам, эта проблема будет усугубляться вследствие изменения климата, существующих экономических тенденций и роста населения.

Для производства водорода требуются значительные объёмы (очищенной) воды в качестве сырья. Поскольку последствия изменения климата продолжают усугублять проблему нехватки водных ресурсов, всё большему числу стран, возможно, стоит оценить, целесообразно ли производство водорода в долгосрочной перспективе. Согласно сценарию агентства IRENA по ограничению глобального потепления 1,5 °C, к 2050 г., по прогнозам, потребуется 409 млн тонн «зелёного» водорода. На его производство уйдёт около 7-9 миллиардов кубических метров (м<sup>3</sup>) воды в год — менее 0,25% сегодняшнего потребления пресной воды (Всемирный банк, без даты-с). Кроме того, имеет значение выбор способа производства: для «зелёного» водорода воды требуется меньше, чем для его «синего» варианта. Солнечные фотоэлектрические и ветроэнергетические технологии потребляют гораздо меньше воды на стадии эксплуатации, чем ТЭЦ, что освобождает всё более ограниченные водные ресурсы (IRENA, 2015). Например, согласно результатам анализа, проведённого агентством IRENA для определяемых на национальном уровне вкладов (ОНУВ) Китая и Индии, было установлено, что масштабирование возобновляемой энергетики, в частности, солнечных фотоэлектрических и ветровых энергоустановок в сочетании с более совершенными технологиями охлаждения, способно снизить интенсивность отбора воды для генерации электричества в этих странах к 2030 году на 42% и 84%, соответственно (IRENA, 2018b; IRENA, 2016b). В регионе Совета сотрудничества арабских государств Персидского залива (ССАПЗ) достижение целевых показателей и реализация планов развёртывания технологий возобновляемой энергии к 2030 году способны сократить отбор воды для производства электроэнергии и связанной с этим добычей топлива на 11,5 трлн литров, или на 17% (IRENA, 2019b).

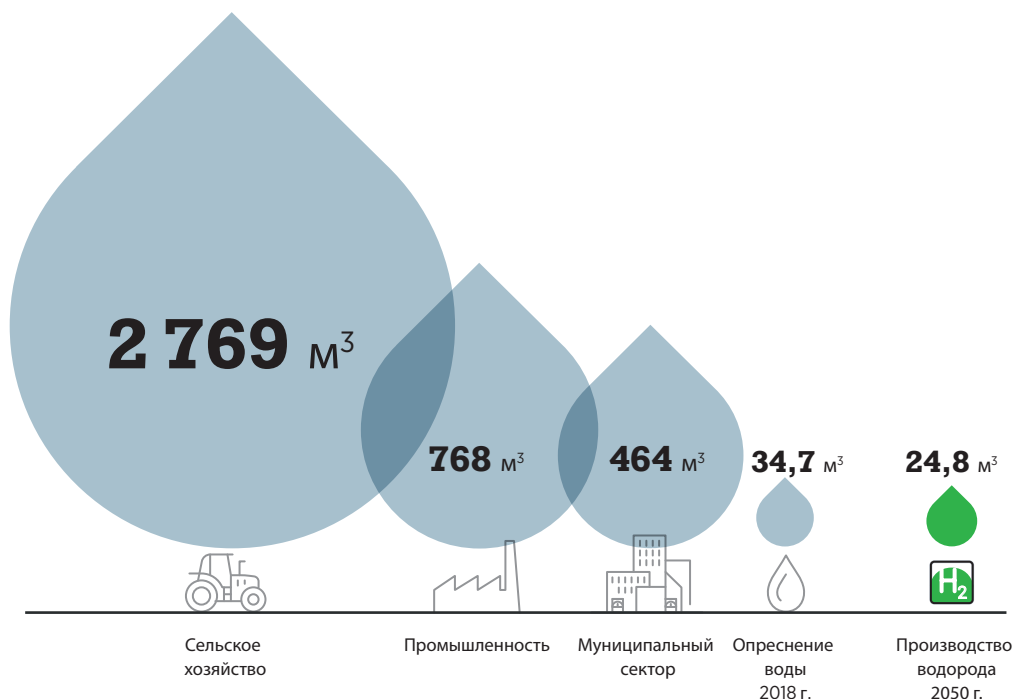


interstock.com

<sup>38</sup> Прогнозный потенциал водорода в отношении глобального потепления на 100-летний период составляет 1,9-4,7 в отличие от показателя 21,2-37,2, прогнозируемого для метана (Field and Derwent, 2021).

Для реализации проектов «зелёного» водорода инвесторы положили глаз на регионы с лучшими солнечными фотоэлектрическими и ветровыми ресурсами. Сложность заключается в том, что более солнечные регионы обычно и самые засушливые. Более 70% проектов с использованием электролизёров запланированы в регионах с нехваткой водных ресурсов, таких как Австралия, Чили, Оман, Саудовская Аравия и Испания (рисунок 5.4). Поэтому для более 85% запланированных проектов производства «зелёного» водорода может потребоваться опреснение воды (Rystad, 2021). В результате опреснения морской воды себестоимость килограмма водорода вырастет на 0,02-0,05 долл. США (Blanco, 2021; Caldera and Breyer, 2017). При этом большинство опреснительных заводов промышленного уровня работают на ископаемых видах топлива.

**Рисунок 5.3** Потребление воды для производства водорода в 2050 г. по сравнению с отдельными отраслями сегодня (миллиардов кубических метров)

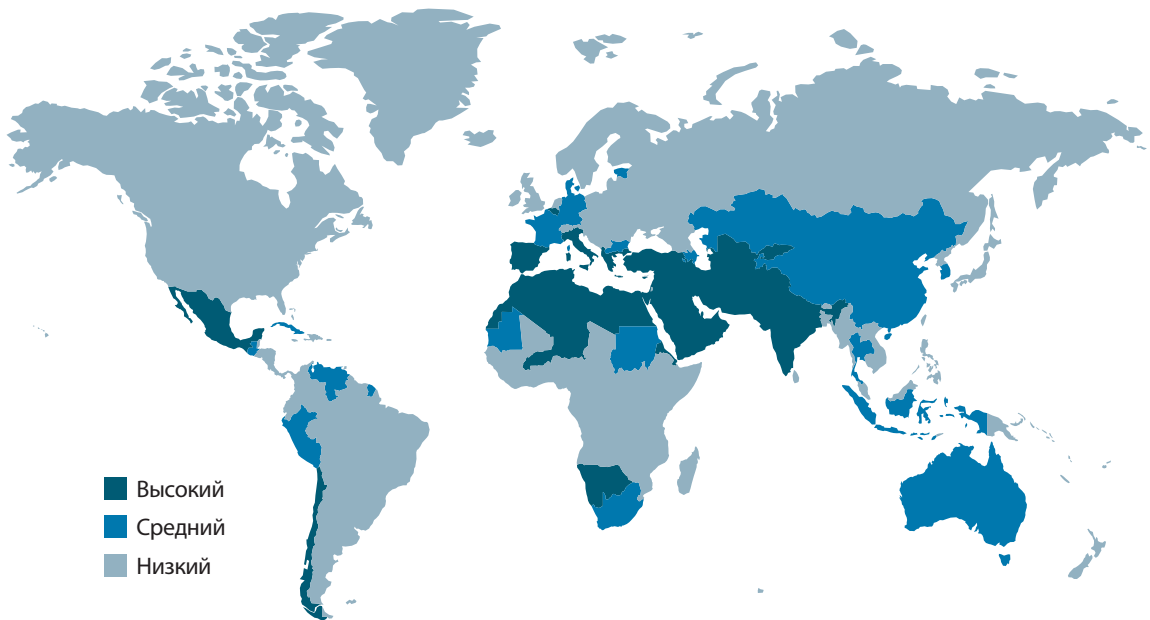


Источник: Blanco (2021).

Примечания: рисунок отражает только потребление, а не отбор воды. Отбор включает в себя воду, которая напрямую возвращается в водоём, из которого она была взята. Потребление включает любую воду, которая преобразуется в другую форму или не возвращается в первоначальный водоём. Хотя большую часть воды можно восстановить, когда водород сжигается или используется в топливном элементе, такая вода обычно не возвращается в первоначальный водоём, и она будет считаться использованной (Beswick, Oliveira and Yan, 2021).

«Зелёный» водород может способствовать повышению безопасности в плане водоснабжения. Опреснение может быть слишком дорогим для таких секторов, как сельское хозяйство или мелкая промышленность, в результате чего вода для них – дефицитный ресурс. Опреснение для производства «зелёного» водорода увеличивает энергопотребление и себестоимость производства на 1-2%, при этом потребляемая электроэнергия является определяющим фактором. Таким образом, «зелёный» водород может подтолкнуть развитие опреснительной отрасли и существенное масштабирование её мощностей. Это также может привести к росту поставок пресной воды не только для электролизёров, но и для других целей, или к снижению затрат на опреснение (IRENA, 2020a). Однако следует отметить, что после опреснения остаётся солевой раствор с большим содержанием соли и химикатов, который после возвращения в море может пагубно отразиться на экологии.

**Рисунок 5.4** Тепловая карта, отражающая уровни нехватки водных ресурсов



Источник: основано на Rystad Energy RenewableCube (2021).

Источник карты: Natural Earth, 2021 г.

Отказ от ответственности: данная карта приведена исключительно в целях наглядности. Показанные на карте границы не подразумевают какую-либо поддержку или принятие их агентством IRENA.



### Конфликты из-за земли и продовольствия

Водород используется для производства всего мирового промышленного аммиака. Аммиак — главный компонент синтетических удобрений, от которых зависит урожайность значительной части культур во всём мире. В настоящее время такие удобрения на основе водорода обеспечивают продовольствием примерно половину всего населения Земли (Ritchie, 2017). Без водорода продуктивность сельского хозяйства резко бы сократилась, поставив под угрозу продовольственную безопасность миллионов людей.

В настоящее время реальной альтернативы водороду для производства синтетических удобрений не существует, при этом водород обычно получают из природного газа и угля без улавливания и хранения углерода. Таким образом, ожидаемый резкий рост в сфере чистого водорода мог бы способствовать декарбонизации глобальной цепочки поставок продовольствия. Такой водород также может повысить мировую продовольственную безопасность в той степени, в которой он увеличит предложение на рынке.

Такие результаты были бы особенно актуальны для стран Африки к югу от Сахары, где в 2018 г. на один гектар приходилось менее 20 килограммов удобрений (кг/га) — в два-три раза меньше, чем требовалось для удовлетворения потребностей сельскохозяйственной отрасли (Всемирный банк, без даты-d). Ненадлежащее использование удобрений приводит к истощению питательных веществ в почве, низкой продуктивности сельского хозяйства и сокращению площади, пригодной для возделывания земли, на душу населения. На этом континенте аммиак в основном производится из природного газа, запасы которого сосредоточены в Алжире, Египте и Нигерии. Однако конкурентоспособный аммиак также можно производить с помощью солнечных и ветровых электростанций: такие проекты заявлены в Египте, Мавритании, Марокко и Намибии (вставка 3.2). Также крайне важна расстановка приоритетов: прежде чем начать экспортировать аммиак, странам следует удовлетворить свои внутренние потребности.





Приход чистого водорода также может отразиться на мировых ценах на продовольствие. Введение квот на использование «зелёного» водорода производителями удобрений (как это планирует сделать Индия) может помочь масштабировать производство такого ресурса. Однако следует внимательно отслеживать влияние этой меры на продовольственную безопасность. В настоящее время стоимость природного газа соответствует 60-80% переменных затрат на производство азотных удобрений (Европейская комиссия, 2019). Колебания цен на газ отражаются и на ценах на удобрения. Этот эффект в полной мере проявился осенью 2021 г., когда резкий рост цен на природный газ вынудил нескольких европейских производителей удобрений частично или полностью сократить производство (Thaplialy, 2021).

Что касается влияния на землю, возможности масштабного использования электролизных установок на основе возобновляемых источников энергии ограничены в некоторых местах, например, в регионах с высокой плотностью населения либо с конкурирующими видами деятельности или функциями (сельским хозяйством или охраняемыми зонами). Однако самое сильное воздействие на землю будут оказывать огромные ветровые и солнечные фотоэлектрические парки, которые необходимо будет построить для выработки требуемых объёмов возобновляемой электроэнергии и «зелёного» водорода. Один проект в Австралии по производству «зелёного» водорода и аммиака на экспорт, Western Green Energy Hub, займёт 15 000 км<sup>2</sup> – это примерно половина территории Бельгии или Лесото. Риск конкурирующих видов землепользования можно снизить, если работающие на возобновляемых источниках установки будут размещаться в незаселённых пустынных регионах и на морских блоках, как в случае с мавританским проектом Nour по производству водорода с использованием ветровых и солнечных электростанций, который может дать начало разработке первого в Африке морского ветрового парка (Collins, 2021b).

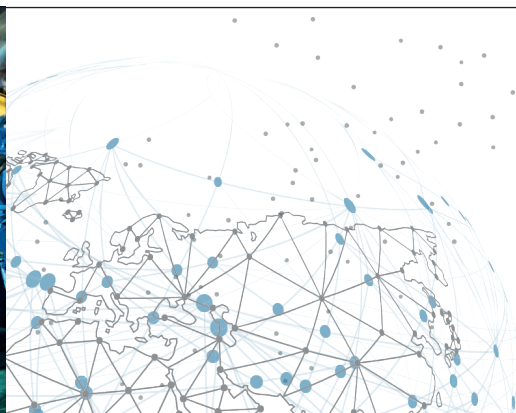
### 5.3 ВОДОРОД И РАЗВИВАЮЩИЕСЯ СТРАНЫ

Многие страны долгое время жили исходя из предположения, что самый экономичный и доступный путь развития должен опираться на ископаемые виды топлива, особенно уголь. Уголь обеспечивает выработку больше трети электроэнергии во всём мире и играет важнейшую роль в таких отраслях, как производство железа и стали. Для ряда быстро развивающихся стран уголь стал топливом, поддерживающим темпы роста в течение последних лет и десятилетий. Например, в Китае в 2020 г. на уголь пришёлся 61% всего объёма произведённой электроэнергии, а в Индии 71% всего электроснабжения зависит от угля (Ember, без даты-a; Ember, без даты-b). Энергоёмкие отрасли, такие как цементная, сталелитейная и химическая промышленность, остаются привязанными к ископаемым видам топлива.

В течение последнего десятилетия появление более дешёвых возобновляемых ресурсов начало ставить под вопрос зависимость от видов топлива 20-го века. Благодаря удешевлению возобновляемых технологий (таких как солнечные фотоэлектрические станции, ветровые электростанции и аккумуляторы) открываются новые пути развития. На сегодняшний день возобновляемые ресурсы обеспечивают самое дешёвое производство электроэнергии; так в 2020 г. их эксплуатационные расходы были ниже, чем у 61% существующих угольных электростанций, без финансовой поддержки (IRENA, 2021e; Lovins, 2021a). В результате у развивающихся стран сегодня есть уникальный шанс «перепрыгнуть» ископаемые виды топлива в электроэнергетической системе. Несколько стран уже так поступило или находится в шаге от перехода к возобновляемым источникам энергии для удовлетворения всего или почти всего роста спроса на электроэнергию (Bond *et al.*, 2021).

Нет оснований полагать, что «прыжок» через ископаемые виды топлива ограничится лишь электроэнергетическим сектором. Например, страны и регионы могут напрямую перейти на электротранспорт, как это сделали Индия и Африка в отношении двух- и трёхколёсных транспортных средств. Чистый водород может обеспечить дополнительные возможности для эффективного «перепрыгивания» во многих отраслях.

Многие развивающиеся страны не один десяток лет используют водород, хоть и лишь в качестве сырья для производства аммиака для удобрений. Несколько стран использует появившиеся возможности для реализации пилотных водородных проектов в новых отраслях. Индонезия, ЮАР, а также Тринидад и Тобаго начинают использовать топливные элементы на основе метанола или аммиака для мачт антенн связи и часто заменяют ими дизельные генераторы в качестве систем резервного электропитания (Romer, 2011). На дорогах Китая, Коста-Рики и Малайзии появились автобусы на топливных элементах (De Sisternes, Fernando and Jackson, 2020). Индия рассматривает возможность обязать НПЗ и заводы по производству удобрений использовать определённую долю «зелёного» водорода (Verma, 2021).



Развивающимся странам всё ещё требуется построить собственную инфраструктуру, в том числе дороги, дома, школы, фабрики, канализационные и электроэнергетические системы. Для этого требуется большое количество энергии и материалов, которые дают много выбросов и зачастую импортируются. Удовлетворение этих потребностей многократно увеличит преимущества «перепрыгивания».

Чистый водород может обеспечить новые промышленные возможности для производства и использования товаров, например, «зелёной» стали. Даже некоторые беднейшие страны мира смогут воспользоваться потенциалом своих возобновляемых энергетических ресурсов для местного производства «зелёного» водорода, создавая новые возможности для экономики и повышая свою энергетическую безопасность. Такой потенциал можно реализовать только усилиями международного сообщества, которое сможет направить в эти страны необходимые ресурсы и поделиться технологиями и ноу-хау.

Весь мир выиграет от использования водорода в развивающихся странах и странах с переходной экономикой, если это поможет сократить выбросы парниковых газов и будет способствовать местному развитию и экономическому росту. С начала нового тысячелетия энергопотребление в развивающихся странах почти удвоилось: на них и на страны с переходной экономикой сейчас приходится более половины глобального спроса на энергию (BP, 2021),<sup>39</sup> даже несмотря на то, что в них потребление на душу населения всё ещё гораздо ниже, чем в развитых странах, и у миллионов людей здесь всё ещё нет доступа к базовым энергетическим услугам.

Однако на текущий момент технологии энергетического перехода слишком дороги для многих развивающихся стран. Поэтому разрыв между богатыми странами, которые могут позволить себе исследования, разработки и внедрение чистого водорода, и более бедными странами, которые не могут этого сделать, может вырасти, прежде чем он сократится, таким образом препятствуя справедливому энергетическому переходу.

Оказание помощи развивающимся странам, особенно наименее развитым, в сфере внедрения водородных технологий с самого начала могло бы предотвратить расширение глобального разрыва по показателю декарбонизации. Доступ к (запатентованным) технологиям, обучению, наращиванию потенциала и доступному по цене финансированию станет ключевым условием для реализации всех возможностей водорода в сфере декарбонизации мировой энергетической системы и для содействия стабильности и справедливости. Это не только вопрос справедливости. Разнообразный водородный рынок создаёт новые возможности для торговли и сотрудничества, снижая риски в цепочке поставок и повышая всеобщую энергетическую безопасность.



© marchmeena29/istock.com

39 Основано на данных о потреблении первичной энергии для стран ОЭСР и других стран.



## ГЛАВА 6.

# СООБРАЖЕНИЯ ПОЛИТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В своём докладе за 2019 г. Глобальная комиссия по геополитике энергетической трансформации заявила, что мир, перешедший к возобновляемой энергетике, будет сильно отличаться от мира, основанного на ископаемых видах топлива (IRENA, 2019a). Кроме того, она отметила, что точный охват и темпы энергетического преобразования предсказать невозможно. В качестве примера можно привести растущую роль водорода. Несколько лет назад водород считался небольшим сегментом в общемировом энергетическом дискурсе. Сегодня он является центральным элементом стратегий декарбонизации для сложно декарбонизируемых секторов благодаря всё большему числу стран и отраслей, делающих ставку на его масштабное применение.

Многие аспекты энергетического перехода всё ещё до конца неясны. Доля возобновляемой энергии на рынке растёт, приводя к системным изменениям. Уже сегодня масштабная электрификация конечных сфер потребления влияет на масштаб и область спроса. Окончательная роль водорода ещё не определена, основная его часть всё ещё производится с использованием ископаемых видов топлива. Производство «зелёного» водорода имеет все шансы для успешного развития, причём не там, где сегодня сконцентрированы нефтегазовые месторождения. Развитие рынков водорода может сопровождаться различными экономическими, социальными, экологическими и геополитическими последствиями. Несмотря на множество неизвестных факторов к 2030 г. следует ожидать значительных успехов в сфере водородной энергетики на пути к декарбонизированной энергетической системе к 2050 г. Ниже приводится ряд соображений, которые будут полезны при формировании политики.



© northlightimages/istock

06

## **Водород является частью гораздо более масштабной картины энергетического перехода, и стратегии его развития и внедрения следует рассматривать в широком контексте.**

Страны должны провести тщательный анализ того, каким образом водород впишется в их общие экономические, социальные, экологические и политические стратегии. Страны, стремящиеся найти своё место в новой экономико-энергетической системе, должны, помимо прочего, проанализировать следующие аспекты: зрелость своего энергетического сектора, нынешний уровень экономической конкурентоспособности и потенциальные социально-экономические последствия каждого выбранного ими варианта действий. Например, страна с достаточными ресурсами возобновляемой энергии и дешёвой электроэнергией вполне может выбрать электролиз для производства конкурентоспособного по стоимости «зелёного» водорода. В других случаях лица, ответственные за разработку политики, могут считать более выгодным курс на другие технологии, поддерживающие энергетический переход (IRENA, 2020b).

Энергетический переход приводит к диверсификации поставщиков, маршрутов поставки и типов энергоносителей, доступных для импорта. Поэтому необходимо тщательно оценить планы и инвестиции в инфраструктуру с учётом того, что такие решения рассчитаны на долгосрочную перспективу, а риски незадействованных активов (и затрат на них) высоки. Например, следует предусмотреть возможность репрофилирования трубопроводной инфраструктуры для перекачивания «зелёных» газов, таких как водород и биометан. При этом технические проблемы и экономические затраты такого репрофилирования следует учесть с самого начала разработки этих проектов.

## **Для быстрого масштабирования использования водорода и обеспечения его долгосрочного вклада в усилия по декарбонизации крайне важно определить правильные приоритеты.**

Глобальные усилия должны быть сосредоточены на тех областях, которые обеспечивают самые непосредственные преимущества и экономию масштаба, особенно в ближайшей перспективе. В первое время торговля водородом, вероятно, будет строиться вокруг двусторонних договорённостей с уже заложенным в них риском невыполнения обязательств одной или другой стороной. Выбор в первую очередь сфер с самым высоким спросом, где водород очевидно является лучшей альтернативой, с большей вероятностью обеспечит экономическую эффективность и снизит чувствительность к рискам, связанным с зарождающимися рынками. Один пример может поддержать, а затем и ускорить переход к «зелёному» водороду в промышленных сферах, где водород уже используется (таких, как переработка и производство аммиака и метанола) (IRENA, 2020b).

Прежде чем перейти на производство «зелёного» водорода, следует взвешенно оценить возможности использования электроэнергии из возобновляемых источников для производственных целей (IRENA, 2020b). В противном случае бессистемное использование «зелёного» водорода способно замедлить энергетический переход и даже вернуть ещё больше ископаемых видов топлива в электроэнергетический баланс. Кроме того, несоблюдение принципа взаимодополняемости может замедлить прогресс в направлении расширения доступа к энергии для тех, у кого его сегодня нет, если страны будут использовать возобновляемые источники энергии прежде всего для экспорта «зелёного» водорода.



© peshkov/istock

## **Для формирования прозрачного водородного рынка с согласованными стандартами и нормами, которые вносят значимый вклад в усилия по смягчению последствий изменения климата, потребуется международное сотрудничество.**

Чистый водород может быть важной частью подхода к глубокой декарбонизации и, в свою очередь, может содействовать геополитической стабильности, расширяя позитивные экономические и политические возможности для стран и регионов и минимизируя риски и потери в области климата. Но если водородные стратегии продолжают стимулировать спрос и предложение на ископаемые виды топлива и будут препятствовать энергоэффективности и электрификации, возникнут риски «углеродной западни». Что касается «синего» водорода, потребуется согласовать и установить нормы для улавливаемого углерода и выбросов метана, чтобы «синий» водород в значительной степени способствовал декарбонизации.

Для исправного функционирования международного рынка водорода крайне важным условием будет прозрачность в отношении методов определения выбросов. Успех рынков чистого водорода зависит от способности устанавливать согласованные и прозрачные правила, стандарты и нормы, помогающие внедрять чистый водород в разных странах, регионах и отраслях. Формирование таких стандартов и норм может стать предметом геополитической конкуренции, но многого можно добиться с помощью активного международного сотрудничества и конструктивного политического и экономического взаимодействия. Агентство IRENA предоставляет полезную глобальную поддержку такому сотрудничеству с помощью своего Рамочного совещания по «зелёному» водороду.

## **Поддержка развития возобновляемой энергетики и «зелёного» водорода в развивающихся странах имеет решающее значение для декарбонизации энергетической системы и может способствовать глобальной справедливости и стабильности.**

Разнообразный водородный рынок поможет создать новые возможности для торговли и сотрудничества, снизить риски в цепочке поставок и повысить всеобщую энергетическую безопасность. Способность стран превратить свой потенциал возобновляемых ресурсов в производство энергии зависит от их способности производить необходимое оборудование и объекты интеллектуальной собственности для поддержки инноваций. В настоящее время производственные мощности сосредоточены всего в нескольких странах. Как следствие, большинство стран зависит от импорта оборудования из относительно небольшого количества мест. В интересах геополитической стабильности и справедливого энергетического перехода будущим импортёрам стоит содействовать диверсификации, давая возможность развивающимся странам с богатыми возобновляемыми ресурсами создавать местные производственно-сбытовые цепочки и «зелёные» отрасли с новыми рабочими местами. Доступ к технологиям, обучению, наращиванию потенциала и доступному по цене финансированию станет важнейшим условием для реализации всех возможностей водорода с целью декарбонизации мировой энергетической системы и содействия глобальной стабильности и справедливости.



## **Геополитические риски можно смягчить, сократив чрезмерное потребление энергии во многих конечных сферах использования.**

Переход к действительно устойчивой промышленности — это не просто смена источников энергии, но и разработка эффективных способов справедливого использования энергии. Для этого необходимо сократить избыточное энергопотребление во многих конечных сферах использования и изменить систему, основанную на непрерывно растущем потреблении. Например, при переходе к декарбонизированной энергетической системе страны могут производить водород для повышения своей энергетической независимости, но всё ещё зависеть от ограниченного количества других стран, поставляющих ей материалы. Инновации, эффективность, вторичная переработка и безотходная экономика — все эти элементы могут помочь уменьшить проблемы, связанные с нехваткой металлов и минеральных ресурсов. Но в долгосрочной перспективе для достижения материальной обеспеченности будет необходимо сократить спрос.

## **Чтобы обеспечить положительные и длительные результаты, лица, ответственные за разработку политики, должны проанализировать более широкие последствия внедрения водорода для устойчивого развития.**

Концепция «безопасности человека» часто приводится в качестве одной из первопричин геополитической нестабильности. Эта концепция, разработанная в Повестке дня в области устойчивого развития до 2030 г. и в 17 Целях устойчивого развития, расширяет повестку дня в сфере безопасности, включая в неё такие угрозы, как бедность и болезни, которые могут подрывать мир и стабильность внутри стран и между ними. В зависимости от способа освоения водород может положительно или отрицательно влиять на результаты устойчивого развития. Например, с технической точки зрения, водные ресурсы, необходимые для водородных технологий, обычно не воспринимаются как препятствие для внедрения водорода. Однако изменение климата умножает связанные с водой риски в тех регионах, которые в настоящее время считаются перспективными для производства водорода. Для того, чтобы предвидеть и смягчать определённые риски, которые могут возникать по мере масштабного развёртывания водородных технологий, необходимо лучше понимать многоплановый характер глобальных угроз и уязвимостей.

Сегодня у правительств разных стран есть уникальная возможность определить условия внедрения водорода, избежать недостатков и неэффективных сторон нынешних систем и повлиять на геополитические результаты. Очевидно, что усиленное внедрение водородных технологий приведёт к сбою в некоторых экономических и политических альянсах и партнёрствах. При условии их внедрения с должной предосторожностью и осмотрительностью этот набор энергетических технологий также даёт возможность продемонстрировать положительные разрушающие силы, укрепляя национальный и региональный суверенитет, стойкость и сотрудничество. Ввиду усиления конкуренции за чистый водород может оказаться полезным опыт использования ископаемых видов топлива. Кроме того, лица, ответственные за разработку политики, могут извлечь первые уроки благодаря пионерам в водородном секторе и воспроизвести их успешный опыт. Но прежде всего потребуются совместные усилия разных стран для эффективной работы в условиях множества неизвестных факторов, а также для смягчения рисков и преодоления препятствий в ближайшие годы.

# ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

**Abad, A.V. и P.E. Dodds (2020)**, "Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges" (Инициативы по определению характеристик «зелёного» водорода: определения, стандарты, гарантии происхождения и проблемы), *Energy Policy*, том 138, 111300.

**Adelphi**, International Alert, Woodrow Wilson International Center for Scholars, and European Union Institute for Security Studies (2015), *A New Climate for Peace: Taking Action on Climate and Fragility Risks (Новый климат для мира: принятие мер против климатических рисков и уязвимостей)*.

**ADNOC (2021a)**, "ADNOC and three Japanese companies to explore hydrogen and blue ammonia opportunities" (ADNOC и три японских компании изучают возможности для водорода и «синего» аммиака), Abu Dhabi National Oil Company, Abu Dhabi, [www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2021/adnoc-and-three-japanese-companies-to-explore-hydrogen-and-blue-ammonia-opportunities](http://www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2021/adnoc-and-three-japanese-companies-to-explore-hydrogen-and-blue-ammonia-opportunities).

**ADNOC (2021b)**, "ADNOC and PETRONAS sign comprehensive strategic framework agreement" (ADNOC и PETRONAS подписали комплексное стратегическое рамочное соглашение), Abu Dhabi National Oil Company, Abu Dhabi, [www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2021/adnoc-and-petronas-sign-comprehensive-strategic-framework-agreement](http://www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2021/adnoc-and-petronas-sign-comprehensive-strategic-framework-agreement).

**ADNOC (2021c)**, "ADNOC and Korea's GS energy explore opportunities to grow Abu Dhabi's hydrogen economy and carrier fuel export position" (ADNOC и корейская компания GS Energy изучают возможности для роста водородной экономики Абу-Даби и его позиций в сфере экспорта топлива), Abu Dhabi National Oil Company, Abu Dhabi, [www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2021/adnoc-and-koreas-gs-energy-explore-opportunities](http://www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2021/adnoc-and-koreas-gs-energy-explore-opportunities).

**African Hydrogen Partnership (2019)**, *Green African Hydrogen Operational Planning (Оперативное планирование по «зелёному» водороду в Африке)*, [www.afr-h2-p.com/documents](http://www.afr-h2-p.com/documents), (обращение к источнику 13 января 2022 г.).

**Agora (2021)**, *12 insights on hydrogen (12 выводов о водороде)*, Agora Energiewende и Agora Industry, [www.agora-energiewende.de/en/publications/12-insights-on-hydrogen-publication/](http://www.agora-energiewende.de/en/publications/12-insights-on-hydrogen-publication/).

**Amelang, S. (2020)**, "Europe vies with China for clean hydrogen superpower status" (Европа соперничает с Китаем за статус супердержавы в сфере чистого водорода), Clean Energy Wire, [www.cleanenergywire.org/news/europe-vies-china-clean-hydrogen-superpower-status](http://www.cleanenergywire.org/news/europe-vies-china-clean-hydrogen-superpower-status).

**Aramco (2020a)**, "Aramco completes its acquisition of a 70% stake in SABIC from the Public Investment Fund (PIF)" (Aramco объявила об успешном завершении сделки по покупке 70% акций SABIC у суверенного фонда Саудовской Аравии (PIF)), [www.aramco.com/en/news-media/news/2020/saudi-aramco-completes-acquisition-of-70-percent-stake-in-sabic](http://www.aramco.com/en/news-media/news/2020/saudi-aramco-completes-acquisition-of-70-percent-stake-in-sabic).

**Aramco (2020b)**, "World's first blue ammonia shipment opens new route to a sustainable future" (Первая в мире поставка «синего» аммиака открывает новый путь к устойчивому будущему), [www.aramco.com/en/news-media/news/2020/first-blue-ammonia-shipment](http://www.aramco.com/en/news-media/news/2020/first-blue-ammonia-shipment).

**Argus (2021)**, "Oman signs land deal for new green hydrogen plant" (Оман заключил земельную сделку для строительства нового водородного завода), [www.argusmedia.com/en/news/2247165-oman-signs-land-deal-for-new-green-hydrogen-plant](http://www.argusmedia.com/en/news/2247165-oman-signs-land-deal-for-new-green-hydrogen-plant).

**Atchison, J. (2021)**, "Ammonia infrastructure: panel wrap-up from the 2020 Ammonia Energy Conference" (Инфраструктура для аммиака: подведение итогов панельного обсуждения в рамках конференции Ammonia Energy Conference 2020 г.), 22 января, [www.ammoniaenergy.org/articles/ammonia-infrastructure/](http://www.ammoniaenergy.org/articles/ammonia-infrastructure/).

**Bataille, C. et al. (2021)**, *Global Facility Level Net-Zero Steel Pathways: Technical Report on the First Scenarios of the Net-Zero Steel Project (Глобальные планы действий на уровне производственных объектов металлургических предприятий: технический отчет о первых проектах по достижению углеродной нейтральности)*, Institute for Sustainable Development and International Relations, Париж, [http://netzerosteel.org/wp-content/uploads/pdf/net\\_zero\\_steel\\_report.pdf](http://netzerosteel.org/wp-content/uploads/pdf/net_zero_steel_report.pdf).

**Bauer, C. et al. (2021)**, *On the climate impacts of blue hydrogen production (О влиянии производства «синего» водорода на климат)*, <https://doi.org/10.33774/CHEMRXIV-2021-HZ0QP>.

**Beswick, R.R., A.M. Oliveira и Y. Yan (2021)**, "Does the green hydrogen economy have a water problem?" (Грозит ли «зелёной» водородной экономике проблема дефицита воды?), *ACS Energy Letters*, том 6, № 9, стр. 3167–3169.

**Black, R. et al. (2021)**, *Taking Stock: A global assessment of net zero targets (Подводя итоги: глобальная оценка целей достижения нулевых выбросов)*, Energy & Climate Intelligence Unit and Oxford Net Zero, Лондон.

**Blanco, H. (2021)**, "Hydrogen production in 2050: How much water will 74 EJ need?" (Производство водорода в 2050 г.: сколько воды потребуется для 74 эксаджоулей?) *Energy Post*, <https://energypost.eu/hydrogen-production-in-2050-how-much-water-will-74ej-need/>.

**BloombergNEF (2021a)**, *New Energy Outlook 2021 (Новый прогноз для энергетики на 2021 г.)*, Bloomberg New Energy Finance, Лондон.

**BloombergNEF (2021b)**, *2H 2021 Hydrogen Market Outlook: China Drives a Gigawatt (Прогноз для рынка водорода на вторую половину 2021 г.: Китай стремится к гигаваттам)*, Bloomberg New Energy Finance, Лондон.

**BloombergNEF (2021c)**, *Decarbonizing Steel: A Net Zero Pathway (Декарбонизация сталелитейной отрасли: план достижения нулевых выбросов)*, Bloomberg New Energy Finance, Лондон.

**BloombergNEF (2021d)**, *Green Hydrogen to Start Undercutting Blue by Mid-2020s («Зелёный» водород станет выгоднее «синего» варианта с середины 20-х годов 21 -го века)*, Bloomberg New Energy Finance, Лондон.

**Федеральное министерство экономики и защиты климата Германии (2021)**, "Minister Altmaier: 'Making further progress on international market ramp-up for green hydrogen'" (Министр Петер Альтмайер: «Дальнейший рост международного рынка «зелёного» водорода»), Федеральное министерство экономики и защиты климата Германии, пресс-релиз, 14 июня, [www.bmwi.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2021/06/20210614-new-funding-instrument-h2global-launched.html](http://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2021/06/20210614-new-funding-instrument-h2global-launched.html), (обращение к источнику 13 января 2022 г.).

**Bogdanov, D., M. Child и C. Breyer (2019)**, "Reply to 'Bias in energy system models with uniform cost of capital assumption'" (Ответ на сдвиг в моделях энергосистем, исходя из постоянной стоимости капитала). *Nature Communication*, том 10, 4587, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12469-y>.

**Bond, K. et al. (2021)**, *Reach for the sun: The emerging market electricity leapfrog (Тяга к солнцу: быстрый рост формирующегося рынка электроэнергии)*, Carbon Tracker.

**Bowen, J. (2021)**, *Fuelling Cooperation: The Indo-Pacific Hydrogen Transformation (Сотрудничество в сфере обеспечения топливом: преобразование на основе водорода в Индо-Тихоокеанском регионе)*, Perth USAsia Center.

**BP (2021)**, *Statistical Review of World Energy 2021 (Статистический обзор мировой энергетики за 2021 г.)*, BP, Лондон, [www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf).

**Brasington, L. (2019)**, "Hydrogen in China" (Водород в Китае) Cleantech Group, [www.cleantech.com/hydrogen-in-china/](http://www.cleantech.com/hydrogen-in-china/).

**Brisbane Times (2021)**, "Fortescue unveils plan for world-leading green hydrogen hub in Qld" (Fortescue раскрывает план по созданию крупнейшего в мире хаба «зелёного» водорода в Квинсленде), 10 октября, [www.brisbanetimes.com.au/](http://www.brisbanetimes.com.au/) (требуется подписка).

**Bullard, N. (2021)**, "A gigafactory for hydrogen could be a game changer" (Гигафабрика водорода может в корне поменять ситуацию на рынке), Bloomberg, [www.bloomberg.com/news/articles/2021-07-01/a-gigafactory-for-hydrogen-could-be-a-game-changer](http://www.bloomberg.com/news/articles/2021-07-01/a-gigafactory-for-hydrogen-could-be-a-game-changer), (требуется подписка).

**CAFCP (2018)**, *The California Fuel Cell Revolution (Революция в сфере топливных элементов в Калифорнии)*, Калифорнийское партнёрство по топливным элементам, июль, стр. 24.

**Caglayan, D.G. et al. (2020)**, "Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe" (Технический потенциал соляных каверн для хранения водорода в Европе), *International Journal of Hydrogen Energy*, том 45, № 11, стр. 6793–6805.

**Caldera, U. и C. Breyer (2017)**, "Learning curve for seawater reverse osmosis desalination plants: Capital cost trend of the past, present, and future" (Накопление опыта для установок опреснения морской воды методом обратного осмоса: тенденция изменения капитальных затрат в прошлом, настоящем и будущем), *Water Resources Research*, том 53, № 12, стр. 10523–10538.

**CARB (2019)**, *2019 Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle Deployment & Hydrogen Fuel Station Network Development (Годовой обзор развёртывания электромобилей на топливных элементах и развития сети водородных заправочных станций в 2019 г.)*, California Air Resources Board, июль, стр. 89.

**Министерство энергетики Чили (2020a)**, *National Green Hydrogen Strategy (Национальная стратегия для «зелёного» водорода)*, Правительство Чили, Сантьяго, [https://energia.gob.cl/sites/default/files/national\\_green\\_hydrogen\\_strategy\\_-\\_chile.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/national_green_hydrogen_strategy_-_chile.pdf).

**Министерство энергетики Чили (2020b)**, "Chile 2020: Green Hydrogen Summit – Highlights" (Чили-2020: Саммит по «зелёному» водороду — основные положения), Правительство Чили, Сантьяго, [https://energia.gob.cl/sites/default/files/giz\\_green\\_hydrogen\\_summit.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/giz_green_hydrogen_summit.pdf).

**Collins, L. (2021a)**, "Green hydrogen now cheaper to produce than grey H2 across Europe due to high fossil gas prices" (Из-за высоких цен на природный газ производство «зелёного» водорода в Европе стало выгоднее «серого» варианта), *Recharge*, [www.rechargenews.com/energy-transition/green-hydrogen-now-cheaper-to-produce-than-grey-h2-across-europe-due-to-high-fossil-gas-prices/2-1-1098104](http://www.rechargenews.com/energy-transition/green-hydrogen-now-cheaper-to-produce-than-grey-h2-across-europe-due-to-high-fossil-gas-prices/2-1-1098104).

**Collins, L. (2021b)**, "New 10GW green hydrogen project in Mauritania could include Africa's first offshore wind farm" (В рамках нового проекта по выработке 10 ГВт на основе «зелёного» водорода в Мавритании может быть построена первая в Африке морская ветровая электростанция), *Recharge*, [www.rechargenews.com/energy-transition/new-10gw-green-hydrogen-project-in-mauritania-could-include-africas-first-offshore-wind-farm/2-1-1074316](http://www.rechargenews.com/energy-transition/new-10gw-green-hydrogen-project-in-mauritania-could-include-africas-first-offshore-wind-farm/2-1-1074316).

**CSET (2021)**, *Outline of the People's Republic of China 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and Long-Range Objectives for 2035 (Обзор 14-го пятилетнего плана Китайской Народной Республики по национальному социально-экономическому развитию, а также долгосрочных целей до 2035 года)*, Center for Security and Emerging Technology, University Джорджтаунский университет, Вашингтон, округ Колумбия, [https://cset.georgetown.edu/wp-content/uploads/t0284\\_14th\\_Five\\_Year\\_Plan\\_EN.pdf](https://cset.georgetown.edu/wp-content/uploads/t0284_14th_Five_Year_Plan_EN.pdf).

**CSIS (2021a)**, *Hydrogen Economy Roadmap of Korea (Программа развития водородной экономики Кореи)*, Центр стратегических и международных исследований, [www.csis.org/analysis/south-koreas-hydrogen-industrial-strategy](http://www.csis.org/analysis/south-koreas-hydrogen-industrial-strategy).

**CSIS (2021b)**, *Japan's hydrogen industrial strategy (Стратегия Японии для водородной промышленности)*, Центр стратегических и международных исследований, [www.csis.org/analysis/japans-hydrogen-industrial-strategy](http://www.csis.org/analysis/japans-hydrogen-industrial-strategy).

**den Ouden, B., (2020),** *A Hydrogen Exchange for the Climate* (Переход на водород для решения климатических проблем), Министерство экономики и климатической политики Нидерландов, [www.government.nl/documents/reports/2020/09/24/a-hydrogen-exchange-for-the-climate](http://www.government.nl/documents/reports/2020/09/24/a-hydrogen-exchange-for-the-climate).

**E4Tech (2021),** *The Fuel Cell Industry Review 2020* (Обзор отрасли топливных элементов за 2020 г.), [www.fuelcellindustryreview.com](http://www.fuelcellindustryreview.com), (обращение к источнику 13 января 2022 г.).

**Egli, F., B. Steffen, B. и T.S. Schmidt (2019),** Bias in energy system models with uniform cost of capital assumption (Сдвиг в моделях энергосистем, исходя из постоянной стоимости капитала). *Nature Communication*, том 10, 4588. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12468-z>.

**EIA (без даты),** "Europe Brent spot price FOB (dollars per barrel)" (Спотовая цена на нефть марки Brent в Европе (долларов за баррель) на условиях поставки FOB), Управление энергетической информации США, Вашингтон, округ Колумбия, [www.eia.gov/dnav/pet/hist/rbrteD.htm](http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/rbrteD.htm).

**Ember (без даты-а),** "China was the only G20 country to see large increase in coal generation in 2020" (Китай был единственной страной Большой двадцатки, в которой в 2020 г. значительно выросла добыча угля), <https://ember-climate.org/global-electricity-review-2021/g20-profiles/china/>.

**Ember (без даты-б),** "India's wind and solar generation tripled since 2015" (Объемы производства ветровой и солнечной энергии в Индии утроились с 2015 г.), <https://ember-climate.org/global-electricity-review-2021/g20-profiles/india/>.

**Emirates News Agency, 2021 г.** "UAE announces Hydrogen Leadership Roadmap, reinforcing Nation's commitment to driving economic opportunity through decisive climate action" (ОАЭ объявили о Дорожной карте лидерства в сфере водорода в поддержку национального обязательства по стимулированию экономических возможностей путём решительных мер по борьбе с изменением климата), [www.wam.ae/en/details/1395302988986](http://www.wam.ae/en/details/1395302988986), (обращение к источнику 13 января 2022 г.).

**Секретариат Энергетической Хартии (2007),** "Putting a price on energy: International pricing mechanisms for oil and gas" (Установление цены на энергию: международные механизмы ценообразования для нефти и газа). Энергетическая хартия, Брюссель. [www.energycharter.org/what-we-do/trade-and-transit/trade-and-transit-thematic-reports/putting-a-price-on-energy-international-pricing-mechanisms-for-oil-and-gas-2007/](http://www.energycharter.org/what-we-do/trade-and-transit/trade-and-transit-thematic-reports/putting-a-price-on-energy-international-pricing-mechanisms-for-oil-and-gas-2007/).

**Комиссия по энергетическому переходу (2021),** Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy (Обеспечение возможности существования водородной экономики: ускорение внедрения чистого водорода в электрифицированной экономике), отчёт Making Mission Possible, Комиссия по энергетическому переходу, [www.energy-transitions.org/publications/making-clean-hydrogen-possible/](http://www.energy-transitions.org/publications/making-clean-hydrogen-possible/).

**Energy Voice (2021),** "CWP signs \$40bn MoU with Mauritania on green hydrogen" (Компания CWP подписала протокол о намерениях в сфере «зелёного» водорода на сумму 40 млрд долл. США с Мавританией), 31 мая, [www.energyvoice.com/renewables-energy-transition/hydrogen/africa-hydrogen/326911/cwp-mou-mauritania-hydrogen/](http://www.energyvoice.com/renewables-energy-transition/hydrogen/africa-hydrogen/326911/cwp-mou-mauritania-hydrogen/).

**Engineering News (2021),** "Namibia selects preferred bidder for pioneering \$9.4bn green hydrogen project" (Намбия выбрала победителя тендера для первого проекта в сфере «зелёного» водорода на сумму 9,4 млрд долл. США), 5 ноября, [www.engineeringnews.co.za/article/namibia-may-launch-second-green-hydrogen-bidding-process-in-early-2022-2021-11-23](http://www.engineeringnews.co.za/article/namibia-may-launch-second-green-hydrogen-bidding-process-in-early-2022-2021-11-23).

**Equinor и OGE (2019),** *The potential of hydrogen for decarbonization of German industry* (Потенциал водорода для декарбонизации немецкой промышленности), Equinor и Open Grid Europe, [www.equinor.com/content/dam/statoil/documents/climate-and-sustainability/H2morrow-The%20Potential-of-Hydrogen-for-Decarbonization-of-German-Industry.pdf](http://www.equinor.com/content/dam/statoil/documents/climate-and-sustainability/H2morrow-The%20Potential-of-Hydrogen-for-Decarbonization-of-German-Industry.pdf).

**Европейская комиссия (2021),** *The European economic and financial system: fostering openness, strength and resilience* (Европейская экономическая и финансовая системы: содействие открытости, стабильности и устойчивости), 19 января, Брюссель.

**Европейская комиссия (2020а),** *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe* (Водородная стратегия для климатически нейтральной Европы), 8 июля, Брюссель, [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf).

**Европейская комиссия (2020б),** *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU: A Foresight Study* (Важнейшие сырьевые материалы для стратегических технологий и секторов в ЕС: прогностическое исследование), Joint Research Centre, Европейская комиссия, Брюссель, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881>.

**Европейская комиссия (2019),** "Fertilisers in the EU: Prices, trade, and use" (Удобрения в ЕС: цены, торговля и применение), *EU Agricultural Market Briefs*, № 15, июнь, [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/food-farming-fisheries/farming/documents/market-brief-fertilisers\\_june2019\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/food-farming-fisheries/farming/documents/market-brief-fertilisers_june2019_en.pdf).

**Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (2020),** *The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture* (Состояние продовольственной отрасли и сельского хозяйства в 2020 г. Решение проблем водоснабжения в сельском хозяйстве), Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН, Рим, <https://doi.org/10.4060/cb1447en>.

**Партнёрское объединение «Топливные элементы и водород» (2014),** *Study on Development of Water Electrolysis in the EU* (Исследование внедрения водяных электролизёров в ЕС), Партнёрское объединение «Топливные элементы и водород», [www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCHJUElectrolysisStudy\\_FullReport%20\(ID%20199214\).pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCHJUElectrolysisStudy_FullReport%20(ID%20199214).pdf).

**Партнёрское объединение «Топливные элементы и водород» (без даты),** *Discover New FCH JU Project Big Hit: Orkney Islands - A Model Hydrogen Territory* (Откройте для себя новый грандиозный проект FCH JU: Оркнейские острова — модель водородной территории), Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking [www.fch.europa.eu/news/discover-new-fch-ju-project-big-hit-orkney-islands-model-hydrogen-territory](http://www.fch.europa.eu/news/discover-new-fch-ju-project-big-hit-orkney-islands-model-hydrogen-territory).

**Field, R. A. и R.G. Derwent (2021),** "Global warming consequences of replacing natural gas with hydrogen in the domestic energy sectors of future low-carbon economies in the United Kingdom and the United States of America" (Влияние на глобальное потепление при замене природного газа водородом в секторе бытовых потребителей энергии будущих низкоуглеродных

экономик Великобритании и Соединённых Штатов Америки), *International Journal of Hydrogen Energy*, том 46, № 58, стр. 30190–30203.

**Financial Times (2021)**, “The race to scale up green hydrogen” (Конкуренция за масштабирование «зелёного» водорода), *Financial Times*, 8 марта, [www.ft.com/content/7eac54ee-f1d1-4ebc-9573-b52f87d00240](https://www.ft.com/content/7eac54ee-f1d1-4ebc-9573-b52f87d00240) (обращение к источнику 13 января 2022 г.).

**Fitchratings (2021)**, *Climate Change “Stranded Assets” Are a Long-Term Risk for Some Sovereigns* («Незадействованные» активы как результат изменения климата — долгосрочный риск для ряда государств-собственников недр), 15 февраля, [www.fitchratings.com/research/sovereigns/climate-change-stranded-assets-are-long-term-risk-for-some-sovereigns-15-02-2021](https://www.fitchratings.com/research/sovereigns/climate-change-stranded-assets-are-long-term-risk-for-some-sovereigns-15-02-2021).

**Институт энергетических солнечных систем общества Фраунгофера (2020)**, “HySpeedInnovation: A joint action plan for innovation and upscaling in the field of water electrolysis technology” (HySpeedInnovation: совместный план действий по инновациям и масштабированию в сфере технологий электролиза воды), [www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/News/Position-Paper-HySpeedInnovation.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/News/Position-Paper-HySpeedInnovation.pdf).

**Фонд мира (2021)**, *Fragile States Index Annual Report 2021* (Ежегодный отчёт по рейтингу уязвимости государств за 2021 г.), Фонд мира, Вашингтон, округ Колумбия, <https://fragilestatesindex.org/wp-content/uploads/2021/05/fsi2021-report.pdf>.

**Группа Gas for Climate (2021a)**, *Extending the European Hydrogen Backbone* (Увеличение протяжённости европейского магистрального трубопровода для транспортировки водорода (European Hydrogen Backbone), [https://gasforclimate2050.eu/sdm\\_downloads/extending-the-european-hydrogen-backbone/](https://gasforclimate2050.eu/sdm_downloads/extending-the-european-hydrogen-backbone/).

**Группа Gas for Climate (2021b)**, *Market State and Trends in Renewable and Low-Carbon Gases in Europe* (Состояние и тенденции рынка возобновляемых и низкоуглеродных газов в Европе), [www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2021/12/Gas-for-Climate-Market-State-and-Trends-report-2021.pdf](https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2021/12/Gas-for-Climate-Market-State-and-Trends-report-2021.pdf).

**Geingob, H. G. (2021)**, “Namibia is poised to become the renewable energy hub of Africa” (Намибия нацелена стать центром возобновляемой энергии в Африке), Всемирный экономический форум, 3 октября, [www.weforum.org/agenda/2021/10/namibia-is-positioned-to-become-the-renewable-energy-hub-of-africa/](https://www.weforum.org/agenda/2021/10/namibia-is-positioned-to-become-the-renewable-energy-hub-of-africa/).

**Ghosh, A. и S. Chhabra (2021)**, *Speed and Scale for Disruptive Climate Technologies: Case for a Global Green Hydrogen Alliance* (Скорость и масштабы внедрения революционных климатических технологий: аргументация в пользу Глобального альянса по «зелёному» водороду), GCF-CEEW Report, Global Challenges Foundation, Стокгольм.

**GIE & Guidehouse (2021)**, “Picturing the value of underground gas storage to the European hydrogen system” (Значение подземного хранения газа для Европейской системы водорода), июнь, [www.gie.eu/gie-presents-new-study-picturing-the-value-of-underground-gas-storage-to-the-european-hydrogen-system/](https://www.gie.eu/gie-presents-new-study-picturing-the-value-of-underground-gas-storage-to-the-european-hydrogen-system/).

**Gielen, D. et al. (2021)**, “EU’s carbon border adjustment mechanism lacks the detail to drive industry’s relocation near clean energy” (Механизм трансграничного углеродного регулирования ЕС нуждается в доработке, чтобы полноценно стимулировать перемещение производств к источникам чистой энергии), *Energy Post*, 15 июня, <https://energypost.eu/eus-carbon-border-adjustment-mechanism-lacks-the-detail-to-drive-industrys-relocation-near-clean-energy/>.

**Gielen, D. et al. (2020)**, “Renewables-based decarbonization and relocation of iron and steel making: A case study” (Декарбонизация на основе возобновляемых источников энергии и смена размещения производств железа и стали на конкретном примере), *Journal of Industrial Ecology*, том 24, № 5, стр. 1113–25.

**Glaeser, E. L. и J.E. Kohlhase (2004)**, “Cities, regions and the decline of transport costs” (Города, регионы и уменьшение транспортных расходов), *Fifty Years of Regional Science*, стр. 197–228, Springer, Берлин, Гейдельберг.

**Правительство Чили (2020)**, “Estrategia Nacional De Hidrógeno Verde [National Green Hydrogen Strategy]” (Национальная стратегия для «зелёного» водорода), ноябрь, [https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia\\_nacional\\_de\\_hidrogeno\\_verde\\_-\\_chile.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf).

**Godula-Jopek, A. (2015)**, “Introduction”, in *Hydrogen Production by Electrolysis* (Введение в производство водорода методом электролиза), стр. 15, Wiley-VCH, Вайнхайм.

**Goldman Sachs (2020)**, *Green Hydrogen: The Next Transformational Driver of the Utilities Industry* («Зелёный» водород: будущий движущий фактор преобразования коммунального сектора), Goldman Sachs, Нью-Йорк, 22 сентября, [www.goldmansachs.com/insights/pages/gs-research/green-hydrogen/report.pdf](https://www.goldmansachs.com/insights/pages/gs-research/green-hydrogen/report.pdf).

**Правительство Австралии (2021)**, “Future hydrogen industry to create jobs, lower emissions and boost regional Australia” (Создание рабочих мест, сокращение выбросов и стимулирование развития регионов Австралии благодаря будущей водородной отрасли), пресс-релиз, [www.minister.industry.gov.au/ministers/taylor/media-releases/future-hydrogen-industry-create-jobs-lower-emissions-and-boost-regional-australia](https://www.minister.industry.gov.au/ministers/taylor/media-releases/future-hydrogen-industry-create-jobs-lower-emissions-and-boost-regional-australia).

**Правительство Австралии (2019)**, *Australia’s National Hydrogen Strategy* (Национальная водородная стратегия Австралии), [www.industry.gov.au/data-and-publications/australias-national-hydrogen-strategy](https://www.industry.gov.au/data-and-publications/australias-national-hydrogen-strategy).

**Правительство Канады (2020)**, *Canada’s Hydrogen Opportunity* (Возможности Канады в сфере водорода), стр. 86.

**Правительство Намибии (2021)**, “Pillar 2: Economic advancement. Activity 2: Investigate the feasibility of green hydrogen and ammonia as a transformative strategic industry” (Принцип 2: экономический прогресс. Мера 2: исследование возможностей «зелёного» водорода и аммиака как преобразующей стратегической отрасли), <https://hppi1.gov.na/activities/activity-2-investigate-the-feasibility-of-green-hydrogen-and-ammonia-as-a-transformative-strategic-industry/>.

**GreenInfo Network и Global Energy Monitor, (2021)**, [https://greeninfo-network.github.io/fossil\\_tracker/](https://greeninfo-network.github.io/fossil_tracker/) (обращение к источнику 13 января 2022 г.).



**Grimm, V. и K. Westphal (2021)**, "The focus on green hydrogen slows down climate protection" (Фокус на «зелёном» водороде тормозит усилия по защите климата), SWP Point of View, [www.swp-berlin.org/en/publication/climate-purists-only-want-green-hydrogen-that-is-a-mistake](http://www.swp-berlin.org/en/publication/climate-purists-only-want-green-hydrogen-that-is-a-mistake), (обращение к источнику 13 января 2022 г.).

**Grinschgl, J., J.M. Пепе и K. Westphal (2021)**, "Eine neue Wasserstoffwelt: Geotechnologische, geoökonomische und geopolitische Implikationen für Europa"; [A new hydrogen world: geotechnological, geoeconomic and geopolitical implications for Europe]" (Новый водородный мир: геотехнологические, геоэкономические и геополитические последствия для Европы), SWP Aktuell, 8 декабря.

**H2Atlas Africa (2021)**, *Atlas of green hydrogen generation potentials in Africa (Атлас возможностей для производства «зелёного» водорода в Африке)*, [www.h2atlas.de](http://www.h2atlas.de) (обращение к источнику 13 января 2022 г.).

**Harding, R. (2019)**, "Japan launches first liquid hydrogen carrier ship" (Япония спустила первое судно для транспортировки жидкого водорода), *Financial Times*, 11 декабря, [www.ft.com/content/8ae16d5e-1bd4-11ea-97df-cc63de1d73f4](http://www.ft.com/content/8ae16d5e-1bd4-11ea-97df-cc63de1d73f4), (требуется подписка).

**HELIOS (без даты)**, "Fostering cleaner energy for our planet" (Содействие внедрению более чистой энергии для нашей планеты), [www.heliosindustry.com/project/](http://www.heliosindustry.com/project/).

**Howarth, R.W. и M.Z. Jacobson (2021)**, "How green is blue hydrogen?" (Насколько «синий» водород является «зелёным?») *Energy Science & Engineering*, том 9, выпуск 10, стр. 1676–1687, <https://doi.org/10.1002/ESE3.956>.

Совет по водороду (2021), *Hydrogen for Net Zero: A Critical Cost-Competitive Energy Vector (Водород для нулевых выбросов: важнейшее направление энергетики с конкурентоспособной себестоимостью)*, <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero-Full-Report.pdf>.

**HyTechCycling (2020)**, *Assessment of critical materials and components in FCH technologies (Оценка важнейших материалов и компонентов для технологий топливных элементов и водорода)*, <http://hytechcycling.eu/wp-content/uploads/d2-1-assessment-of-critical-materials-den-components-in-fch-technologies.pdf>.

**Iberdrola (без даты)**, "Iberdrola builds the largest green hydrogen plant for industrial use in Europe" (Iberdrola строит крупнейший завод по производству «зелёного» водорода для промышленного использования в Европе), [www.iberdrola.com/about-us/lines-business/flagship-projects/puertollano-green-hydrogen-plant](http://www.iberdrola.com/about-us/lines-business/flagship-projects/puertollano-green-hydrogen-plant).

**МЭА (2021а)**, *Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector (Нулевые выбросы к 2050 году: дорожная карта для мирового энергетического сектора)*, Международное энергетическое агентство, Париж, [https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector\\_CORR.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf).

**МЭА (2021b)**, *Methane Tracker 2021 – Analysis (Инструмент отслеживания выбросов метана в 2021 г. — анализ)*, Международное энергетическое агентство, Париж, [www.iea.org/reports/methane-tracker-2021](http://www.iea.org/reports/methane-tracker-2021).

**МЭА (2021с)**, *Global Hydrogen Review 2021 (Глобальный отчёт о водороде 2021 г.)*, Международное энергетическое агентство, Париж, [www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021](http://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021).

**МЭА (2021d)**, "Could the green hydrogen boom lead to additional renewable capacity by 2026?" (Может ли бум на рынке «зелёного» водорода привести к масштабированию возобновляемых мощностей к 2026 году?), Международное энергетическое агентство, Париж, 1 декабря, [www.iea.org/articles/could-the-green-hydrogen-boom-lead-to-additional-renewable-capacity-by-2026](http://www.iea.org/articles/could-the-green-hydrogen-boom-lead-to-additional-renewable-capacity-by-2026).

**МЭА (2021е)**, *Global EV Outlook 2021 (Прогноз для мирового рынка электромобилей 2021 г.)*, Международное энергетическое агентство, Париж, [www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021](http://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021).

**МЭА (2021f)**, *World Energy Outlook 2021 (Прогноз развития мировой энергетики 2021 г.)*, Международное энергетическое агентство, Париж, [www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021](http://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021).

**МЭА (2021g)**, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (Роль важнейших минералов в переходе к чистой энергии)*, Международное энергетическое агентство, Париж.

**МЭА (2020)**, *World Energy Outlook 2020 (Прогноз развития мировой энергетики 2020 г.)*, Международное энергетическое агентство, Париж, [www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020](http://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020).

**МЭА (2019а)**, *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities (Будущее водорода. Использование сегодняшних возможностей)*, Международное энергетическое агентство, Париж.

**МЭА (2019б)**, *Africa Energy Outlook 2019 – World Energy Outlook Special Report (Обзор энергетики Африки в 2019 г. — специальный отчёт по прогнозу развития мировой энергетики)*, Международное энергетическое агентство, Париж, [www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2019](http://www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2019).

**МГЭИК (2021)**, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis (Изменение климата в 2021 г.: физическая научная основа). Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Вклад Рабочей группы I в Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата)*.

**IRENA и Международная организация труда (2021)**, *Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2021 (Возобновляемая энергия и рабочие места — ежегодный обзор 2021 г.)*, Международное агентство по возобновляемым источникам энергии, Международная организация труда, Абу-Даби, Женева.

**IRENA, МЭА, REN21 (2020)**, *Renewable energy policies in a time of transition: Heating and cooling (Политика в области возобновляемой энергетики во время энергетического перехода: тепло-и холодоснабжение)*, IRENA, Абу-Даби.

**Онлайн-инструмент IRENA INSPIRE (2021)**, <http://inspire.irena.org/Pages/home.aspx> (обращение к источнику 13 января 2022 г.).

**IRENA (ещё не опубликовано-а)**, *Global hydrogen trade to meet the 1.5 °C climate goal: Part II – Technology review of hydrogen carriers (Глобальная торговля водородом для достижения климатической цели 1,5°С: часть II — обзор технологий для носителей водорода)*, IRENA, Абу-Даби.

- IRENA (ещё не опубликовано-б)**, *Green hydrogen for industry: A guide to policy making* («Зелёный» водород для промышленности: руководство по формированию политики), IRENA, Абу-Даби.
- IRENA (2021a)**, *World Energy Transitions Outlook* (Прогноз преобразования мировой энергетической системы), IRENA, Абу-Даби.
- IRENA (2021b)**, *Green Hydrogen Supply: A Guide to Policy Making* (Поставки «зелёного» водорода: руководство по формированию политики), IRENA, Абу-Даби.
- IRENA (2021c)**, *Renewable Power Generation Costs in 2020* (Стоимость производства электроэнергии из возобновляемых источников в 2020 г.), IRENA, Abu Dhabi.
- IRENA (2021d)**, *A pathway to decarbonise the shipping sector by 2050* (План декарбонизации транспортного сектора к 2050 году), IRENA, Абу-Даби.
- IRENA (2021e)**, "Majority of new renewables undercut cheapest fossil fuel on cost" (Большинство новых возобновляемых источников энергии сокращают стоимость самого дешевого ископаемого топлива), 22 июня, [www.irena.org/newsroom/pressreleases/2021/Jun/Majority-of-New-Renewables-Undercut-Cheapest-Fossil-Fuel-on-Cost](http://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2021/Jun/Majority-of-New-Renewables-Undercut-Cheapest-Fossil-Fuel-on-Cost).
- IRENA (2020a)**, *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal* (Снижение себестоимости «зелёного» водорода: увеличение мощности и масштабирование производства электролизёров для достижения климатической цели 1,5°C), IRENA, Абу-Даби.
- IRENA (2020b)**, *Green Hydrogen: A Guide to Policy Making* («Зелёный» водород: руководство по формированию политики), IRENA, Абу-Даби.
- IRENA (2020c)**, *Energy subsidies: Evolution in the global energy transformation to 2050* (Субсидии для энергетического сектора: ход преобразования глобальной энергетической системы к 2050 году), IRENA, Абу-Даби.
- IRENA (2019a)**, *A New World: The Geopolitics of the Energy Transformation* (Новый мир: геополитика энергетической трансформации), IRENA, Абу-Даби.
- IRENA (2019b)**, *Renewable Energy Market Analysis: GCC 2019* (Анализ рынка возобновляемой энергии: ССАГПЗ 2019), IRENA, Abu Dhabi.
- IRENA (2018a)**, *Renewable Power-To-Hydrogen - Innovation Landscape Brief* (Превращение возобновляемой энергии в водород — обзор инновационного ландшафта), IRENA, Абу-Даби.
- IRENA (2018b)**, *Water Use in India's Power Generation: Impact of Renewables and Improved Cooling Technologies to 2030* (Использование воды для производства электроэнергии в Индии: влияние возобновляемых ресурсов и усовершенствованных технологий охлаждения на период до 2030 года), IRENA, Абу-Даби.
- IRENA (2016a)**, *A Path to Prosperity: Renewable Energy for Islands* (Путь к процветанию: возобновляемая энергия для островов), IRENA, Абу-Даби.
- IRENA (2016b)**, *Water Use in China's Power Sector: Impact of Renewables and Cooling Technologies to 2030* (Использование воды в энергетическом секторе Китая: влияние возобновляемых ресурсов и технологий охлаждения на период до 2030 года), IRENA, Абу-Даби.
- IRENA (2015)**, *Renewable Energy in the Water, Energy and Food Nexus* (Возобновляемая энергия в системе связей воды, энергии и продовольствия), IRENA, Абу-Даби.
- Jaffe, A.M. и R. Soligo (2006)**, "Market Structure in the New Gas Economy: Is Cartelisation Possible? (Структура рынка в новой газовой экономике: возможна ли картелизация?)" *Natural Gas and Geopolitics: From 1970 to 2040*, стр. 439–464, Cambridge University Press, Нью-Йорк.
- Министерство окружающей среды Японии (2020)**, *Summary of Japan's hydrogen strategy* (Обзор водородной стратегии Японии), [www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka\\_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/Summary\\_of\\_Japan's\\_Hydrogen\\_Strategy.pdf](http://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/Summary_of_Japan's_Hydrogen_Strategy.pdf).
- Keohane, R.O. и J.S.Nye (2001)**, *Power and Interdependence* (Энергия и взаимозависимость) (3rd ed.), Longman, New York.
- Khalili S., (2019)**, "Global Transportation Demand Development with Impacts on the Energy Demand and Greenhouse Gas Emissions in a Climate-Constrained World" (Изменение глобального спроса на транспортные перевозки с последствиями для спроса на энергию и количество выбросов парниковых газов в условиях изменения климата), *Energies*, том 12, № 20, 3870. <https://doi.org/10.3390/en12203870>.
- Kiemel, S., et al. (2021)**, "Critical materials for water electrolysers at the example of the energy transition in Germany" (Важнейшие материалы для водяных электролизёров на примере энергетического перехода в Германии), *International Journal of Energy Research*, том 45(7), стр. 9914–9935.
- Kleen, G. и E. Padgett (2021)**, *Durability-adjusted fuel cell system cost* (Стоимость систем топливных элементов с регулируемым сроком службы), Министерство энергетики США, 8 января, [www.hydrogen.energy.gov/pdfs/21001-durability-adjusted-fcs-cost.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/21001-durability-adjusted-fcs-cost.pdf).
- The Korea Herald (2019)**, "S. Korea to build 3 hydrogen-powered cities by 2022" (Южная Корея планирует построить 3 города с энергоснабжением на основе водорода к 2022 году), 10 октября, [www.koreaherald.com/view.php?ud=20191010000806](http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20191010000806), (обращение к источнику 13 января 2022 г.).
- Koyama, K. (2021)**, "China replaced Japan as world's largest LNG importer in 1st half of 2021: A Japanese perspective on the international energy landscape" (Китай пришёл на смену Японии в качестве крупнейшего в мире импортёра СПГ в 1-й половине 2021 г.: перспективы Японии на международном энергетическом рынке), 26 июля, Институт экономики энергетики, Япония.
- La Repubblica (2021)**, "Snam, Alverà guarda al futuro: dalla Gigafactory allo stoccaggio" [Snam, Alverà looks to the future: From Gigafactory to storage] (Генеральный директор Snam Марко Альвера смотрит в будущее: от гигафабрики к хранению), [https://finanza.repubblica.it/News/2021/11/29/snam\\_alvera\\_guarda\\_al\\_futuro\\_dalla\\_gigafactory\\_allo\\_stoccaggio-101/](https://finanza.repubblica.it/News/2021/11/29/snam_alvera_guarda_al_futuro_dalla_gigafactory_allo_stoccaggio-101/).



**Longden, T., et al. (2022)**, "Clean' hydrogen? – Comparing the emissions and costs of fossil fuel versus renewable electricity based hydrogen" (Чистый водород? — сравнение выбросов и затрат для ископаемых видов топлива с аналогичными показателями для возобновляемого электричества на основе водорода), *Applied Energy*, том 306, часть B, 118145, [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921014215#s0010](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921014215#s0010).

**Lovins, A. (2021a)**, "Profitably decarbonizing heavy transport and industrial heat: transforming these 'harder-to-abate' sectors is not uniquely hard and can be lucrative" (Экономически выгодная декарбонизация большегрузного транспорта и систем промышленного тепла: преобразование этих сложно декарбонизируемых секторов не является уникально сложной задачей и может принести прибыль), RMI Innovation Center, Басолт, Колорадо, [www.rmi.org/profitable-decarb/](http://www.rmi.org/profitable-decarb/).

**Lovins, A. (2021b)**, "Decarbonizing our toughest sectors – profitably" (Декарбонизация наших самых сложных секторов — с выгодой), *Журнал MIT Sloan Management Review*, 4 августа, <https://sloanreview.mit.edu/article/decarbonizing-our-toughest-sectors-profitably/>.

**Ludwig, M., (2021)**, The Green Tech Opportunity in Hydrogen (Экологичные технические возможности для водорода), 12 апреля, [www.bcg.com/en-in/publications/2021/capturing-value-in-the-low-carbon-hydrogen-market](http://www.bcg.com/en-in/publications/2021/capturing-value-in-the-low-carbon-hydrogen-market).

**Mander, B. (2020)**, "Chile seeks to turn solar boom into green hydrogen bonanza" (Чили стремится направить активный рост солнечной энергетики на эффективное производство «зелёного» водорода), *Financial Times*, 31 августа, [www.ft.com/content/16481d72-1495-4b24-9c59-97ea9a856cc1](http://www.ft.com/content/16481d72-1495-4b24-9c59-97ea9a856cc1), (требуется подписка).

**McWilliams, B. и G. Zachmann (2021)**, "A new economic geography of decarbonisation?" (Новая экономическая география декарбонизации?) Bruegel, 8 ноября, [www.bruegel.org/2021/11/a-new-economic-geography-of-decarbonisation/#:~:text=The%20interactive%20map%20allows%20users,encouraged%20to%20experiment%20for%20themselves](http://www.bruegel.org/2021/11/a-new-economic-geography-of-decarbonisation/#:~:text=The%20interactive%20map%20allows%20users,encouraged%20to%20experiment%20for%20themselves).

**Министерство энергетики, подземных и водных ресурсов и окружающей среды Марокко (2021)**, Green Hydrogen Roadmap (Дорожная карта для «зелёного» водорода), Министерство энергетики, подземных и водных ресурсов и окружающей среды Марокко, Правительство Марокко, [www.mem.gov.ma/Lists/Lst\\_rapports/Attachments/36/Feuille%20de%20route%20de%20hydrog%C3%A8ne%20vert.pdf](http://www.mem.gov.ma/Lists/Lst_rapports/Attachments/36/Feuille%20de%20route%20de%20hydrog%C3%A8ne%20vert.pdf).

**Министерство экономики, торговли и промышленности (2017)**, *Basic hydrogen strategy (Базовая стратегия для водорода)*, Министерство экономики, торговли и промышленности, Правительство Японии, 26 декабря, [www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226\\_003b.pdf](http://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf), (обращение к источнику 13 января 2021 г.).

**Minke, C. et al. (2021)**, "Is iridium demand a potential bottleneck in the realisation of large-scale PEM water electrolysis?" (Является ли спрос на иридий «узким местом» для электролиза воды с использованием протонообменной мембраны?), *International Journal of Hydrogen Energy*, том 46, выпуск 46, стр. 23581–23590.

**Mission Possible Partnership (2021)**, *Net Zero Steel: Sector Transition Strategy (Металлургия с нулевыми выбросами: стратегия перехода для отрасли)*, октябрь 2021 г.

**Министерство экономики и финансов (2020)**, *Korea's green new deal (Новая сделка Кореи в сфере «зелёного» водорода)*, Министерство экономики и финансов, [www.greenclimate.fund/sites/default/files/event/koreas-green-new-deal-moef-international-conference-green-new-deal.pdf](http://www.greenclimate.fund/sites/default/files/event/koreas-green-new-deal-moef-international-conference-green-new-deal.pdf).

**Moya Rivera, J. и A. Boulamanti (2016)**, *Production Costs from Energy Intensive Industries in the EU and Third Countries (Производственные затраты в энергоёмких отраслях ЕС и третьих стран)*, EUR 27729, JRC100101, Бюро официальных публикаций Европейского союза, Люксембург, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7e4fe297-084c-11e6-b713-01aa75ed71a1/language-en>.

**Muttitt, G. et al. (2021)**, *Step off the gas: International public finance, natural gas and clean alternatives in the Global South (Уход от газа: международное государственное финансирование, природный газ и «чистые» альтернативные ресурсы в странах глобального Юга)*, International Institute for Sustainable Development, июнь.

**Nagashima, M. (2018)**, *Japan's hydrogen strategy and its economic and geopolitical implications (Стратегия Японии для водорода и её экономические и геополитические последствия)*, Французский институт международных отношений (ИФРИ), октябрь, [www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/nagashima\\_japan\\_hydrogen\\_2018\\_.pdf](http://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/nagashima_japan_hydrogen_2018_.pdf).

**Niermann, M. et al. (2019)**, "Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs)—techno-economic analysis of LOHCs in a defined process chain" (Жидкие органические носители водорода (ЛОHC) — технико-экономический анализ ЛОHC в заданной технологической цепочке), *Energy and Environmental Science*, том 12, № 1, стр. 290–307.

**Open Grid Europe (2021)**, *H2tomorrow: Act today to be greenhouse gas neutral by 2050 (Завтрашний день H2: действуй сегодня, чтобы достичь нулевых выбросов парниковых газов к 2050 году)*, <https://oge.net/en/us/projects/our-hydrogen-projects/h2tomorrow>.

**Patonia, A. (2021)**, "Hydrogen: Savior or boondoggle for Russia?" (Водород: спасение или пустая трата времени для России?) 18 августа, [www.gmfus.org/news/hydrogen-savior-or-boondoggle-russia](http://www.gmfus.org/news/hydrogen-savior-or-boondoggle-russia).

**Paulsson, L. и M. Durisin (2021)**, "Energy crunch hits pig slaughter and fertilizers in risk to food" (Энергетический кризис ударил по убойным предприятиям и производителям удобрений, создав риск для поставок продовольствия), *Bloomberg*, 17 сентября, [www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-17/europe-s-energy-woes-hit-fertilizers-in-another-threat-to-food](http://www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-17/europe-s-energy-woes-hit-fertilizers-in-another-threat-to-food), (требуется подписка).

**Philibert, C. (2017)**, *Renewable Energy for Industry: From Green Energy to Green Materials and Fuels (Возобновляемая энергия для промышленности: от «зелёной» энергии к «зелёным» материалам и топливу)*, *отчём Insights Series МЭА, ОЭСР/МЭА, Париж*, [https://iea.blob.core.windows.net/assets/48356f8e-77a7-49b8-87de-87326a862a9a/Insights\\_series\\_2017\\_Renewable\\_Energy\\_for\\_Industry.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/48356f8e-77a7-49b8-87de-87326a862a9a/Insights_series_2017_Renewable_Energy_for_Industry.pdf).

**Platinum Matthey, (без даты)**, <http://www.platinum.matthey.com/prices/price-charts>.

**Pollard, S. (1981)**, *Peaceful Conquest: The Industrialization of Europe (Мирное завоевание: индустриализация в Европе)* - 1760-1970, Oxford University Press, Оксфорд.

**Администрация порта Роттердам (2020)**, "Hydrogen vision" (Водородная концепция), 7 мая, [www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2021-06/hydrogen-vision-port-of-rotterdam-authority-may-2020.pdf](http://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2021-06/hydrogen-vision-port-of-rotterdam-authority-may-2020.pdf).

**Piria, R. et al. (2021)**, "Critical review of the IPHE working paper 'Methodology for determining the GHG emissions associated with the production of hydrogen'" (Критический обзор документа Международного партнёрства по водородной экономике (IPHE) «Методология определения выбросов парниковых газов, связанных с производством водорода»), Adelphi и Öko Institut e.V., [www.adelphi.de](http://www.adelphi.de), (обращение к источнику 13 января 2022 г.).

**Prinzhofer, A., C.S.T. Cissé и A.B. Diallo (2018)**, "Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebouougou (Mali)" (Открытие больших запасов природного водорода в Буракебугу (Мали)), *Международный журнал водородной энергетики*, том 43, № 42, стр. 19315–19326.

**Radowitz, B. (2021)**, "Germany eyes world's cheapest green hydrogen from Namibia amid global 'race for best sites'" (Германия рассматривает самый дешёвый в мире «зелёный» водород из Намибии на фоне глобальной конкуренции за лучшие места), *Recharge News*, 25 августа.

**Ram M. et al. (2020)**, *Powerfuels in a Renewable Energy World - Global volumes, costs, and trading 2030 to 2050 (Топливо в мире возобновляемой энергии — мировые объёмы, затраты и торговля в период с 2030 до 2050 гг.)*, Лаппенэрантский технологический университет и Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Лаппенэранта, Берлин.

**Ratcliffe, V., S. El Wardany и M. Martin (2020)**, "Saudi Arabia aims next to be largest hydrogen exporter" (Следующая цель Саудовской Аравии — стать крупнейшим экспортёром водорода), *Bloomberg*, 18 ноября, [www.bloomberquint.com/business/biggest-in-oil-saudis-aim-next-to-be-largest-hydrogen-exporter](http://www.bloomberquint.com/business/biggest-in-oil-saudis-aim-next-to-be-largest-hydrogen-exporter).

**Ratcliffe, V., S. Kim и K. Park (2021)**, "Saudi Arabia to ship gas to South Korea and take CO<sub>2</sub> back" (Саудовская Аравия планирует поставлять газ в Южную Корею и забирать CO<sub>2</sub>), *Bloomberg*, 3 марта, [www.bloomberg.com/news/articles/2021-03-03/saudi-arabia-to-ship-gas-to-south-korea-and-take-back-the-co2](http://www.bloomberg.com/news/articles/2021-03-03/saudi-arabia-to-ship-gas-to-south-korea-and-take-back-the-co2), (требуется подписка)

**Recharge News (2021a)**, "Modi pledges massive green hydrogen 'quantum leap' to Indian energy independence" (Нарендра Моди обещает «квантовый скачок» в сфере промышленного производства «зелёного» водорода для обеспечения энергетической независимости Индии), 16 августа, [www.rechargenews.com/energy-transition/modi-pledges-massive-green-hydrogen-quantum-leap-to-indian-energy-independence/2-1-1052701](http://www.rechargenews.com/energy-transition/modi-pledges-massive-green-hydrogen-quantum-leap-to-indian-energy-independence/2-1-1052701).

**Recharge News (2021b)**, "Our largest energy source: South Korea plans 40 foreign hydrogen bases to meet vast future demand" (Наш крупнейший источник энергии: Южная Корея планирует использовать 40 иностранных центров производства и торговли водородом для удовлетворения огромного будущего спроса), 1 декабря, [www.rechargenews.com/energy-transition/our-largest-energy-source-south-korea-plans-40-foreign-hydrogen-bases-to-meet-vast-future-demand/2-1-1110526](http://www.rechargenews.com/energy-transition/our-largest-energy-source-south-korea-plans-40-foreign-hydrogen-bases-to-meet-vast-future-demand/2-1-1110526).

**Recharge News (2021c)**, "New 10GW green hydrogen project in Mauritania could include Africa's first offshore wind farm" (В рамках нового проекта «зелёного» водорода на 10 ГВт в Мавритании может быть построена первая в Африке морская ветровая электростанция), 28 сентября, [www.rechargenews.com/energy-transition/new-10gw-green-hydrogen-project-in-mauritania-could-include-africas-first-offshore-wind-farm/2-1-1074316](http://www.rechargenews.com/energy-transition/new-10gw-green-hydrogen-project-in-mauritania-could-include-africas-first-offshore-wind-farm/2-1-1074316).

**Reuters (2021)**, "Deutsche Boerse's EEX to launch hydrogen index in 2022" (Энергетическая и газовая биржа Deutsche Boerse планирует запустить индекс цен на водород (EEX) в 2022 г.), [www.reuters.com/business/sustainable-business/exclusive-deutsche-boeres-eex-launch-hydrogen-index-2022-2021-11-24/](http://www.reuters.com/business/sustainable-business/exclusive-deutsche-boeres-eex-launch-hydrogen-index-2022-2021-11-24/).

**РИА Новости (2021)**, "Не только газ: Россия нашла новый способ заработать на Европе" <https://ria.ru/20210505/vodorod-1729501925.html>.

**Ritchie, H. (2017)**, "How many people does synthetic fertilizer feed?" (Сколько людей кормит синтетическое удобрение?), *Our World in Data*, 7 ноября, <https://ourworldindata.org/how-many-people-does-synthetic-fertilizer-feed>, обновлено 30 апреля 2020 г.

**Romer, R. (2011)**, "Fuel cell systems provide clean backup power in telecom applications worldwide" (Системы топливных элементов обеспечивают чистое резервное электропитание в телекоммуникационных системах по всему миру) 33-я Международная конференция по телекоммуникациям и энергетике ИИЭР 2011 г. (INTELEC), стр. 1–2, doi: <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2011.6099732>.

**Roos, T. и J. Wright (2021)**, *Powerfuels and Green Hydrogen*, EU-South Africa (Топливо и «зелёный» водород, ЕС-ЮАР) [www.euchamber.co.za/wp-content/uploads/2021/02/Powerfuels-Summary-Report-South-Africa-EU-SA\\_Partners-for-Growth-Final-28-Jan-2021.pdf](http://www.euchamber.co.za/wp-content/uploads/2021/02/Powerfuels-Summary-Report-South-Africa-EU-SA_Partners-for-Growth-Final-28-Jan-2021.pdf).

**Правительство России (2021)**, «Повестка дня: проект Концепции развития водородной энергетики, федеральная поддержка регионов», <http://government.ru/en/news/42970/>, (обращение к источнику 13 января 2022 г.).

**Rystad Energy RenewableCube, (2021)**, "Green hydrogen projects will stay dry without a parallel desalination market to provide fresh water" (Проекты в сфере «зелёного» водорода останутся нереализованными без параллельного рынка опреснения для поставок пресной воды), пресс-релиз, 27 сентября, [www.rystadenergy.com/newsevents/news/press-releases/green-hydrogen-projects-will-stay-dry-without-a-parallel-desalination-market-to-provide-fresh-water](http://www.rystadenergy.com/newsevents/news/press-releases/green-hydrogen-projects-will-stay-dry-without-a-parallel-desalination-market-to-provide-fresh-water), (обращение к источнику 13 января 2022 г.).

**S&P Global (без даты)**, *Hydrogen Price Assessments (Анализ цен на водород)*, S&P Global Platts. Лондон.

**Saunio, M. et al. (2016)**, "The global methane budget 2000-2012" (Глобальный бюджет для метана на 2000–2012 гг.), *Earth System Science Data*, том 8, № 2, стр. 697–751. <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>.

**De Sisternes J., J. Fernando и С.Р. Jackson (2020)**, *Green Hydrogen in Developing Countries* («Зелёный» водород в развивающихся странах), Группа Всемирного банка, Вашингтон, округ Колумбия, <http://documents.worldbank.org/curated/en/953571597951239276/Green-Hydrogen-in-Developing-Countries>.

**Smith, A. (1776)**, *The Wealth of Nations* (Исследование о природе и причинах богатства народов), W. Strahan и T. Cadell, Лондон.

**Smolinka, T., M. Günther и J. Garche (2011)**, *Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien* (Status and development potential of electrolysis for the production of hydrogen from renewable energy) (Положение дел и потенциал развития электролиза для производства водорода из возобновляемой энергии), Институт энергетических солнечных систем общества Фраунгофера, [www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now-studie-wasserelektrolyse-2011.pdf](http://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now-studie-wasserelektrolyse-2011.pdf).

**Smyth, J. (2021)**, "Green groups fume as Canberra rejects world's biggest renewables project" (Группы «зелёных» пришли в ярость после отклонения Канберрой крупнейшего проекта в сфере возобновляемой энергии), *Financial Times*, 21 июня, (обращение к источнику 13 января 2022 г.).

**Steinberger-Wilckens, R. et al. (Eds.) (2017)**, *The Role of Hydrogen and Fuel Cells in Delivering Energy Security for the UK* (Роль водорода и топливных элементов в обеспечении энергетической безопасности Великобритании), H2FC Supergen, Лондон.

**Стратегический консультативный комитет по технологической дорожной карте и Обществу автомобильных инженеров (SAE-Китай) (2016)**, *Hydrogen Fuel Cell Vehicle Technology Roadmap* (Дорожная карта для технологий в сфере автомобилей на водородных топливных элементах), [https://static1.squarespace.com/static/5b7d93fe0dbda3ea011485b9/t/5d93c88ef490cb28e94bd655/1569966226975/FCV+Tech+Roadmap\\_China.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5b7d93fe0dbda3ea011485b9/t/5d93c88ef490cb28e94bd655/1569966226975/FCV+Tech+Roadmap_China.pdf).

**Systemiq (2020)**, *The Paris Effect: How the Climate Agreement is Reshaping the Global Economy* (Парижский эффект: как климатическое соглашение преобразует глобальную экономику), [https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2020/12/The-Paris-Effect\\_SYSTEMIQ\\_Full-Report\\_December-2020.pdf](https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2020/12/The-Paris-Effect_SYSTEMIQ_Full-Report_December-2020.pdf).

**Thapliyal, D. (2021)**, "Fertilizers and the cross-commodity impact of record high gas prices" (Удобрения и межтоварное влияние рекордных цен на газ), независимая служба калькуляции цен ICIS, [www.icis.com/explore/resources/news/2021/10/05/10686659/topic-page-fertilizers-in-the-cross-commodity-impact-of-record-high-gas-prices](http://www.icis.com/explore/resources/news/2021/10/05/10686659/topic-page-fertilizers-in-the-cross-commodity-impact-of-record-high-gas-prices).

**UCL (без даты)**, "Economic rents" (Экономическая рента), Университетский колледж Лондона, [www.ucl.ac.uk/bartlett/public-purpose/research/economic-rents](http://www.ucl.ac.uk/bartlett/public-purpose/research/economic-rents).

**UN Comtrade (2021)**, <https://comtrade.un.org/data>.

**Генеральная Ассамблея ООН (2009)**, *Climate change and its possible security implications* (Изменение климата и его возможные последствия для безопасности). Доклад Генерального секретаря, 11 сентября, Организация Объединённых Наций, Нью-Йорк.

**ООН (2019)**, *World Population Prospects 2019* (Перспективы роста численности населения в мире, 2019 г.), Организация Объединённых Наций, Нью-Йорк.

**ЮНКТАД, (2020)**, *Review of Maritime Transport* (Обзор морского транспорта), 2020 г., Конференция ООН по торговле и развитию, [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020_en.pdf).

**ЮНЕСКО (2021)**, *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water* (Всемирный доклад Организации Объединённых Наций о состоянии водных ресурсов 2021 г.: ценность воды), Организация Объединённых Наций по вопросам образования, науки и культуры, Париж.

**РКИК (2021)**, "COP26 world leaders summit- statement on the breakthrough agenda" (Саммит COP26 — заявление мировых лидеров о «Повестке прорыва»), Конференция Организации Объединённых Наций по изменению климата, Великобритания, 2021 г., Рамочная конвенция ООН об изменении климата, <https://ukcop26.org/cop26-world-leaders-summit-statement-on-the-breakthrough-agenda/>.

**Конгресс США (2021)**, H.R.5376 – *Build Back Better Act* (Закон «Построить лучше, чем было»), [www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376/text](http://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376/text).

**Van de Graaf, T. и В.К. Sovacool (2020)**, *Global Energy Politics* (Глобальная энергетическая политика), John Wiley & Sons.

**van Wijk, A. и F. Wouters (2021)**, "Hydrogen–The Bridge Between Africa and Europe" (Водород — мост между Африкой и Европой), в Weijnen M.P.C., Z. Lukso и S. Farahani (Eds.) *Shaping an Inclusive Energy Transition*, Springer, Хам, [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-74586-8\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-74586-8_5).

**Verma, N. (2021)**, "India to require refiners, fertiliser plants to use some green hydrogen" (Индия требует от нефтеперерабатывающих заводов и предприятий по производству удобрений использовать определённую долю «зелёного» водорода), *Reuters*, 10 августа, (обращение к источнику 13 января 2022 г.).

**Vortex (2021a)**, "Global annual average global horizontal irradiation" (Среднегодовая глобальная горизонтальная радиация), *Мировой атлас IRENA*, <https://globalatlas.irena.org/workspace>.

**Vortex (2021b)**, "Global annual average wind speed at 100 m height" (Глобальная среднегодовая скорость ветра на высоте 100 м), *Мировой атлас IRENA*, <https://globalatlas.irena.org/workspace>.

**Wang, X. (2021)**, "Alkaline vs. PEM: Breaking electrolyzer technologies myths" (Щелочной электролиз в сравнении с технологией на основе протонообменной мембраны: мифы о революционных технологиях электролиза), 28 июля, Bloomberg, (требуется подписка).

**МИРЭС (2021)**, "National hydrogen strategies" (Национальные водородные стратегии), *Мировой энергетический совет*, Лондон, [www.worldenergy.org/assets/downloads/Working\\_Paper\\_-\\_National\\_Hydrogen\\_Strategies\\_-\\_September\\_2021.pdf](http://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf).

**Weidlich, B. (2021)**, "Namibia optimistic about new green hydrogen industry" (Намибия с оптимизмом смотрит в будущее новой отрасли «зелёного» водорода), 8 ноября, <https://namibian.org/news/economics/namibia-optimistic-about-new-green-hydrogen-industry>.

**White, L.V. et al. (2021)**, "Towards emissions certification systems for international trade in hydrogen: The policy challenge of defining boundaries for emissions accounting" (Работа над системами сертификации выбросов для международной торговли водородом: задача политики по определению границ для расчёта выбросов), *Energy*, том 215, 119139.

**Всемирный банк (без даты-а)**, "GDP (current, US\$)" (ВВП (текущий, долл. США), Всемирный банк, Вашингтон, округ Колумбия, <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>.

**Всемирный банк (без даты-б)**, "Energy imports, net (% of energy use), World Development Indicators." (Чистый импорт энергии (% от энергопотребления). Показатели мирового развития) <https://data.worldbank.org/indicator/EG.IMP.CON.S.ZS>.

**Всемирный банк (без даты-с)**, "Annual freshwater withdrawals, total (billion cubic meters)" (Совокупный ежегодный отбор пресной воды (миллиардов кубических метров), <https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWTL.K3>.

**Всемирный банк (без даты-д)**, "Fertiliser consumption (kilograms per hectare of arable land)" (Потребление удобрений (килограммов на гектар пахотной земли), <https://data.worldbank.org/indicator/AG.CON.FERT.ZS>.

**Мировой энергетический совет (2021)**, *Hydrogen on the horizon: Hydrogen demand and cost dynamics (Водород на горизонте: спрос на водород и динамика затрат)*, Мировой энергетический совет, сентябрь 2021 г., [www.worldenergy.org/publications/entry/working-paper-hydrogen-demand-and-cost-dynamics](http://www.worldenergy.org/publications/entry/working-paper-hydrogen-demand-and-cost-dynamics).

**Zgonnik, V. (2020)**, "The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review" (Залегание и геолого-геофизические исследования природного водорода: комплексный обзор), *Earth-Science Reviews*, том 203, 103140.



# Геополитические аспекты трансформации энергетики: водородный фактор

Онлайн-доступ к публикации и Приложению:



[www.irena.org](http://www.irena.org)

ISBN 978-92-9260-456-1