

**В.Ю. Поташников, В.А. Барина, П.А. Леваков,  
В.Х. Бердин, Г.М. Юлкин**

# Оценка взаимных положительных эффектов от развития солнечной и ветровой электроэнергии и водородного транспорта<sup>1</sup>

УДК: 338.49

**Аннотация.** Рассматривается опыт ведущих стран мира в сфере разработки и применения технологий производства, транспортировки, хранения и использования водорода. Выделены первичные экономико-социальные факторы развития водородной энергетики, ее роль в достижении долгосрочных целей стран по выбросам парниковых газов. С помощью высокодетализированной модели репрезентативной энергетической системы RUHOUR был оценен потенциал «зеленого» водорода для нужд транспорта в России, включая его влияние на цены на электроэнергию. Анализ чувствительности показал, что при цене более 2 долл./кгH<sub>2</sub> (~0.2 долл. за литр бензина) вероятнее всего весь потенциальный спрос на водород может быть удовлетворен. Развитие широкомасштабной инфраструктуры генерации зеленого водорода в России может способствовать снижению выбросов парниковых газов, ускорить диверсификацию структуры экспорта и сократить цены на электроэнергию для конечных пользователей.

**Ключевые слова:** декарбонизация; водород; RUHOUR; PЭС; развитие транспорта; солнечная энергия; ветряная энергия

## Введение

На пороге третьего десятилетия XXI века перспектива использования водорода для энергетических целей резко изменилась. Принятое в 2015 г. Парижское климатическое соглашение предполагает снижение уровня выбросов парниковых газов, которое должно предотвратить повышение глобальной температуры больше, чем на 2 °С по сравнению с доиндустриальным уровнем, а по самым оптимистичным сценариям – уложиться в пределах 1,5 °С<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-18-00126. URL: <https://rscf.ru/project/21-18-00126/>.

<sup>2</sup> United Nations, Paris Agreement. 2015. URL: [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf) (дата обращения: 26.08.2022).

К настоящему времени многие страны взяли курс на полную декарбонизацию своих экономик к 2050–2060 гг.<sup>3</sup>

Двумя крупнейшими источниками углеродных выбросов являются транспорт (прежде всего – автомобильный) и энергетика, им же отводится ведущая роль в продвижении на пути к экономике «нулевых выбросов» или климатически нейтральной экономике. В частности, за счет перехода на потребление экологически чистого топлива – энергии на основе возобновляемых источников (ВИЭ) или водорода.

Ежегодно в мире производится около 120 млн т водорода, из которых 2/3 составляет чистый водород и 1/3 – его смесь с другими газами; 95% промышленного водорода выделяется из природного газа и угля, оставшиеся 5% извлекаются в процессе электролиза хлорида натрия, как побочный продукт при производстве хлора. Уже существуют технологии получения водорода из возобновляемых источников энергии, но сегодня они применяются только в рамках нескольких демонстрационных проектов<sup>4</sup>.

В настоящий момент водород в качестве ресурса используется в основном в химической и нефтехимической промышленности. Для заправки автомобилей он используется довольно редко, хотя в некоторых аспектах водород имеет ряд преимуществ. Так, в отличие от углеродного топлива, при его сжигании не выделяются парниковые газы. По сравнению с электричеством он больше подходит для длительных поездок. Тем не менее его распространению в транспортном сегменте препятствуют высокая стоимость автомобилей на водородном топливе и недостаточный уровень развития соответствующей инфраструктуры.

Развитие технологий использования и производства водородного топлива актуально для России. Оно позволит, во-первых, диверсифицировать структуру ее экспорта, во-вторых, снизить объем выбросов парниковых газов. Наконец, развитие современных

---

<sup>3</sup> World Bank. State and Trends of Carbon Pricing 2020. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/bcc20088-9fbf-5a71-8fa0-41d871df4625> (дата обращения: 26.08.2022).

<sup>4</sup> International Renewable Energy Agency. Hydrogen: A renewable energy perspective. 2019. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA\\_Hydrogen\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf) (дата обращения: 26.08.2022).

технологических проектов – одна из ключевых задач в рамках достижения технологического суверенитета.

Одним из способов оценки потенциала развития рынка водородного топлива в России является моделирование его производства и потребления на территории страны в условиях относительно низкой стоимости углеродного топлива. Именно эту задачу и поставили перед собой авторы в настоящем исследовании.

### **Декарбонизация и водородный транспорт**

В настоящее время транспорт генерирует около 25% глобальных прямых выбросов углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), связанных с процессами сжигания бензина и дизельного топлива. При этом дорожные транспортные средства (легковые автомобили, грузовики, автобусы и мотоциклы) производят примерно три четверти глобальных транспортных выбросов<sup>5</sup>. В целях сокращения последних ряд стран разработали и реализуют программы отказа от использования двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на транспорте (табл. 1), которые затрагивают в основном сегмент пассажирских автомобилей.

Предполагается, что автомобили с ДВС, работающие на бензине и дизельном топливе, будут постепенно вытесняться из глобального автопарка электромобилями и транспортными средствами, работающими на водородных топливных элементах, которые на сегодняшний день считаются одними из наиболее экологичных.

Существуют разные прогнозы относительно темпов и возможностей перехода к автомобильному парку с нулевыми выбросами. Так, в одном из исследований [Sen & Miller, 2022] базовый сценарий для глобального рынка предусматривает переход от 3% «зеленых» автомобилей в 2020 г. к 28% в 2050 г. Более позитивный сценарий предполагает, что к указанному сроку в мире будет 49% таких автомобилей, а самый оптимистичный подразумевает почти полное избавление от автомобилей с ДВС. Для автобусов и небольших грузовых автомобилей прогнозы в целом похожи, а вот для крупных грузовиков достижение отметки в 50% возможно только в наиболее оптимистичном сценарии.

---

<sup>5</sup> The International Council on Clean Transportation. URL: <https://theicct.org/> (дата обращения: 29.08.2022).

**Таблица 1. Планы стран по отказу от двигателей внутреннего сгорания и текущий процент автомобилей с нулевыми эмиссиями (2025–2050 гг.)**

| Страна         | Сегмент   | Цель   | Год  | % машин с нулевыми эмиссиями (2020) | % от общей мировой эмиссии (2020) |
|----------------|---|--|------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Норвегия       | Пассажирские автомобили,<br>легкие коммерческие автомобили,<br>городские автобусы | Продажа новых транспортных средств только с нулевыми выбросами               | 2025 | 54,3                                | 0,12                              |
| Нидерланды     | Городские автобусы  | Покупка новых транспортных средств только с нулевыми выбросами               | 2025 | 20,5                                | 0,40                              |
|                | Пассажирские автомобили   | Продажа новых транспортных средств только с нулевыми выбросами               | 2030 |                                     |                                   |
| Швеция         | Пассажирские автомобили   | Запрет на продажу транспортных средств на бензине и дизеле                   | 2030 | 9,5                                 | 0,12                              |
| Великобритания | Пассажирские автомобили,<br>легкие коммерческие автомобили                        | Запрет на продажу транспортных средств на бензине и дизеле, а также гибридов | 2035 | 6,6                                 | 0,87                              |
| Франция        | Пассажирские автомобили,<br>легкие коммерческие автомобили                        | Запрет на продажу транспортных средств на ископаемом топливе                 | 2040 | 6,7                                 | 0,78                              |
| Испания        | Пассажирские автомобили,<br>легкие коммерческие автомобили                        | Продажа новых транспортных средств только с нулевыми выбросами               | 2040 | 7,2                                 | 0,60                              |
| Германия       | Пассажирские автомобили   | Продажа новых транспортных средств только с нулевыми выбросами               | 2050 | 6,7                                 | 1,77                              |
| Канада         | Пассажирские автомобили,<br>легкие коммерческие автомобили                        | Продажа новых транспортных средств только с нулевыми выбросами               | 2040 | 2,3                                 | 1,51                              |

**Источник.** Составлено авторами на основе данных Фонда «Стратегических разработок»<sup>6</sup> и [Sen & Miller, 2022; Crippa et al., 2021].

<sup>6</sup> Фонд «Центр стратегических разработок», Аналитический центр ТЭК РЭА Минэнерго России, ООО «Ситуационный центр». Климатическая повестка России: реагируя на международные вызовы. 2021. URL: [https://www.dipacademy.ru/documents/2267/2021\\_1\\_Доклад\\_Климат\\_ЦСР\\_АЦ\\_РЭА\\_СЦ.pdf](https://www.dipacademy.ru/documents/2267/2021_1_Доклад_Климат_ЦСР_АЦ_РЭА_СЦ.pdf) (дата обращения: 25.08.2022).

Мы в данной работе фокусируемся на сегменте автомобилей на топливных элементах, которые являются одним из видов автомобилей с нулевыми выбросами, со своими преимуществами и недостатками<sup>7</sup>.

В сценариях, представленных Deloitte<sup>8</sup>, предполагается, что к 2030 г. в мире будут эксплуатироваться 5,5 млн автомобилей, работающих на водородном топливе (FCEVs), подавляющее их количество – в Китае, Японии и Европе. При сохранении текущей динамики автомобильного сектора это составит примерно 8% от совокупных продаж автомобилей<sup>9</sup>. Для их заправки в разных странах будет обустроено 12200 станций. В том же исследовании отмечается, что конкурентоспособность водородного топлива в сегменте пассажирских перевозок постепенно растет. И капитальные издержки по установке топливных систем, и эксплуатационные расходы сокращаются, тогда как продолжительность службы топливных элементов растет, и, как ожидается, к 2030 г. увеличится вдвое относительно 2020 г.

Преимуществом водородных автомобилей по сравнению с электрокарами является возможность быстрой заправки и стабильность работы (аккумуляторы электрокаров теряют емкость по мере старения автомобиля и быстро разряжаются при высоких и низких температурах). Кроме того, тяжелый вес батарей делает их использование невыгодным на грузовом транспорте. Таким образом, автомобили на топливных элементах остаются одним из вариантов для больших легковых автомобилей, внедорожников и фургонов с более тяжелыми циклами использования, в том числе с целью коммерческой эксплуатации (такси или каршеринг).

Главный их недостаток на сегодняшний день – высокая цена. На текущий момент такие автомобили не представлены в бюджетном сегменте, что затрудняет их распространение. Однако,

---

<sup>7</sup> Lexology. Battery electric vs hydrogen – which is the future for electric vehicles? URL: <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=1bf1cbf0-ac2f-4b39-a3de-2df77a9a515e> (дата обращения: 04.07.2022).

<sup>8</sup> Deloitte. Fueling the Future of Mobility: Hydrogen and fuel cell solutions for transportation. 2020. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf> (дата обращения: 29.08.2022).

<sup>9</sup> Statista. Number of cars sold worldwide from 2010 to 2022, with a 2023 forecast. URL: <https://www.statista.com/statistics/200002/international-car-sales-since-1990/> (дата обращения: 04.07.2023).

по оценкам International Renewable Energy Agency (IRENA)<sup>10</sup>, уже к 2030 г. общая стоимость владения автомобилем на топливных элементах будет меньше, чем аналогичного по мощности авто с ДВС (при годовом пробеге не ниже 14 тыс. км), кроме того, их цена сократилась уже более чем на 80% за последние 10 лет.

В настоящее время модельный ряд автомобилей на водородном топливе довольно мал, информация о некоторых моделях легковых автомобилей на водороде, присутствующих на рынке ЕС, представлена в таблице 2 (отметим, что грузовиков такого типа в Европе пока нет). Для сравнения в таблице приведены некоторые электромобили из разных ценовых сегментов.

**Таблица 2. Характеристики некоторых моделей легковых автомобилей на водородном топливе и электромобилей на рынке ЕС**

| Показатель                | Toyota MIRAI II | Hyundai NEXO | Honda Clarity Fuel Cell | Nissan Leaf   | Ford Mach-E | Tesla Model 3 |
|---------------------------|-----------------|--------------|-------------------------|---------------|-------------|---------------|
| Тип топлива               | Водородное      |              |                         | Электрическое |             |               |
| Пробег на полном баке, км | 650             | 756          | 589                     | 240           | 370         | 423           |
| Мощность мотора, кВт/л.с. | 135/184         | 120/163      | 130/176                 | 40/147        | 70/266      | 60/283        |
| Вместимость бака, кг      | 5,6             | 6,33         | 5                       | –             |             |               |
| Тип ТС                    | Седан           | SUV          | Седан                   | Седан         | SUV         | Седан         |
| Цена, евро                | 63900           | 69000        | 60450                   | 25000         | 43300       | 46400         |

**Источник.** Составлено авторами на основе ресурсов H2 Live URL: <https://h2.live/en/fahren/> (дата обращения: 28.08.2022) и Car and Driver URL: <https://www.caranddriver.com/> (дата обращения: 10.07.2023).

Как можно заметить, автомобили на водородном топливе характеризуются большим размером пробега «на полном баке», но стоят значительно дороже, чем даже электромобили премиального сегмента. Тем не менее с развитием технологий их цена неизбежно будет снижаться. Так, за 2010–2019 гг. стоимость электромобилей в расчете на километр пробега сократилась в четыре раза<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> IRENA. Electric Vehicles Technology Brief. 2017. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/IRENA\\_Electric\\_Vehicles\\_2017.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/IRENA_Electric_Vehicles_2017.pdf) (дата обращения: 29.08.2022).

<sup>11</sup> IEA. Average price and driving range of BEVs, 2010–2019. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/average-price-and-driving-range-of-bevs-2010-2019> (дата обращения: 12.07.2023).

На данный момент во всем мире водородный транспорт представлен в недостаточном для достижения поставленных климатических целей объеме. В России же данный сегмент только начинает развиваться. Автомобилей на водородном топливе в стране единицы, в широкой продаже их нет. На текущий момент работают три водородные заправки – в Москве, Дмитрове и Черноголовке<sup>12</sup>. Тем не менее отечественные разработчики активно представляют прототипы таких авто<sup>13,14</sup>.

Масштабы и сроки внедрения водородного транспорта будут зависеть от ряда факторов:

- наличия достаточно широкого предложения моделей по различным критериям и в различных сегментах (общественный транспорт, легковые и грузовые автомобили, внедорожники и пр.);
- объемов производства водорода как энергетического ресурса и доли его использования на транспорте;
- развития сети инфраструктуры для заправки автомобилей водородным топливом.

Второй из названных факторов будет зависеть от экономической целесообразности использования водорода в качестве топлива. Оценим его перспективы, рассчитав текущую стоимость производства и транспортировки водорода для нужд автотранспорта.

## **Производство и транспортировка водорода**

Из известных науке способов получения водорода практический интерес представляют наиболее изученные и освоенные технологии. Некоторые из них уже используются в химической и нефтехимической промышленности. Это паровая конверсия углеводородов, газификация угля или нефтяных остатков, электролиз воды.

---

<sup>12</sup> Энергетика и промышленность России. Дефицит отечественных разработок и заправок: что мешает развитию водородного транспорта в России. URL: <https://www.eprussia.ru/epr/449-450/8791957.htm> (дата обращения: 04.07.2023).

<sup>13</sup> Первый «водородный» электробус от «Камаза». URL: [https://kamaz.ru/press/releases/pervuu\\_vodorobus\\_ot\\_kamaz/](https://kamaz.ru/press/releases/pervuu_vodorobus_ot_kamaz/) (дата обращения: 04.07.2023).

<sup>14</sup> В России появился первый в мире водородный автомобиль представительского класса. URL: [https://www.gazeta.ru/auto/news/2021/05/31/n\\_16045340.shtml](https://www.gazeta.ru/auto/news/2021/05/31/n_16045340.shtml) (дата обращения: 04.07.2023).

Согласно отчету Международного Энергетического Агентства (International Energy Agency, IEA)<sup>15</sup>, по состоянию на 2019 г. большая часть промышленного водорода производится из ископаемого топлива: примерно 75% общего объема из природного газа, около 23% – из угля. Наибольший спрос на чистый водород предъявляют нефтехимическая (33%) и химическая промышленность (40%). В транспортном секторе спрос пока невелик.

Издержки производства 1 кг водорода из природного газа составляют от 1 до 2,5 долл. США (или 0,75–5 долл. на 100 км пути), в зависимости от региона и наличия технологии улавливания и хранения углерода (Carbon Capture and Sequestration)<sup>16</sup>. Однако при производстве водорода из природного газа неизбежно выделяется CO<sub>2</sub>, что делает бессмысленным использование водородных автомобилей с точки зрения задачи сокращения выбросов парниковых газов. Технологии улавливания и хранения углерода помогают решить эту проблему лишь отчасти. Поэтому в последнее время при проектировании и строительстве новых мощностей в качестве потенциального источника энергии чаще всего рассматриваются атомные электростанции и ВИЭ.

Если использовать солнечную и ветровую электроэнергию, издержки производства возрастают до 1,6–4 долл. и более, в зависимости от региона. В отчете IRENA<sup>17</sup> приведена более подробная детализация, согласно которой ветровая электроэнергия позволяет в среднем обеспечить более низкую стоимость водорода по сравнению с солнечной.

По данным Европейского водородного форума (European Hydrogen Forum)<sup>18</sup>, в 2020 г. во многих странах уже было выгодно производить водород за счет возобновляемой энергии. Его эксперты прогнозируют, что к 2050 г. стоимость за килограмм водорода достигнет 0,8–1,6 долл. США в зависимости от региона. Компания NEL, один из крупнейших игроков на рынке

---

<sup>15</sup> International Energy Agency. The Future of Hydrogen. 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (дата обращения: 28.08.2022).

<sup>16</sup> Комплекс технологий, направленный на улавливание углеродов, образующихся в процессе производства, их транспортировку и долгосрочное хранение.

<sup>17</sup> IRENA. Hydrogen: A renewable energy perspective. 2019. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA\\_Hydrogen\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf) (дата обращения: 26.08.2022).

<sup>18</sup> European Hydrogen Forum. Green Hydrogen: Time to Scale Up. 2020. URL: [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/M.%20Tengler\\_ppt%20%28ID%2010183472%29.pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/M.%20Tengler_ppt%20%28ID%2010183472%29.pdf) (дата обращения: 29.08.2022).

водородной энергетики, установила целевые показатели стоимости килограмма «зеленого» водорода на уровне 1,5 долл. в США уже к 2025 г.<sup>19</sup>

По состоянию на 2021 г. в мире насчитывалось 228 водородных проектов по всей цепочке создания стоимости<sup>20</sup>. Общий объем инвестиций, необходимых для достижения целей по развитию водородной энергетики, по оценке IRENA, составляет более 300 млрд долл. до 2030 г.<sup>21</sup>

Существуют два различных подхода к организации производства водорода в качестве транспортного топлива, каждый из них обладает своими преимуществами и недостатками. Первый предполагает производство в малых объемах, максимально приближенное к месту потребления. Здесь выше издержки производства, но исключены транспортные расходы до потребителя. Второй вариант предполагает, что водород в больших количествах производится на крупных заводах и затем развозится по сети заправок автомашинами, по железной дороге или отправляется по трубопроводам. В этом случае издержки производства ниже, КПД выше и гораздо проще наладить улавливание и связывание или повторное использование CO<sub>2</sub>. Однако этот подход требует организации обширной системы хранения и поставки чистого водорода потребителям, а эти вопросы пока плохо проработаны с экономической точки зрения.

В Bloomberg Finance<sup>22</sup> приводятся сравнительные расчеты стоимости транспортировки водородного топлива в сжатой форме. Перевозка грузовым транспортом на короткие расстояния (в пределах городской агломерации) обойдется в сумму от 0,65 до 1,73 долл. США за килограмм топлива. При дальних перевозках

---

<sup>19</sup> Nel CMD2021: Launches 1.5 USD/kg target for green renewable hydrogen to outcompete fossil alternatives. URL: <https://nelhydrogen.com/press-release/nel-cmd-2021-launches-1-5-usd-kg-target-for-green-renewable-hydrogen-to-outcompete-fossil-alternatives/> (дата обращения: 01.06.2023).

<sup>20</sup> Hydrogen Council, McKinsey & Company. Hydrogen Insights. A perspectives of hydrogen investment, market development and cost competitiveness. 2021. URL: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021-Report.pdf> (дата обращения: 29.08.2022).

<sup>21</sup> IRENA. Hydrogen: A renewable energy perspective. 2019. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA\\_Hydrogen\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf) (дата обращения: 26.08.2022).

<sup>22</sup> Bloomberg Finance L.P. Hydrogen Economy Outlook. 2020. URL: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf> (дата обращения: 29.08.2022).

верхняя граница издержек возрастает до 3,87 долл. (между городами) или до 6,70 долл. (между континентами). Отметим, что на большие расстояния водород перевозится в жидкой форме, так, например, в 2022 г. была совершена первая поставка партии жидкого водорода из Австралии в Японию<sup>23</sup>. Также водород можно транспортировать в химически связанной форме, например, в виде метана или аммиака, но «на месте» приходится ставить разделительную установку.

«Зеленый» водород, получаемый с использованием ветровой и солнечной энергии, является приоритетом для стран Евросоюза, поскольку его производство соответствует политике достижения климатической нейтральности ЕС, способствует созданию новых рабочих мест и обеспечивает экономический рост.

Достижение целей, обозначенных опубликованной в 2020 г. дорожной картой Европейской комиссии<sup>24</sup>, потребует больших капиталовложений. К 2030 г. предполагается повысить производство «зеленого» водорода в Европе до 10 млн т, а также ввести в эксплуатацию электролизеры с совокупной мощностью 40 ГВт. Предварительно, с настоящего времени и до 2030 г. инвестиции в электролизеры, необходимые для получения «зеленого» водорода из воды, могут составить от 24 до 42 млрд евро. Для их энергообеспечения потребуется около 80–120 ГВт солнечной и ветровой энергии, что предполагает еще около 220–340 млрд евро вложений в расширение и подключение соответствующих генерирующих мощностей. Инвестиции в улавливание и хранение углерода оцениваются примерно в 11 млрд евро за тот же период. Наконец, система транспортировки, распределения и хранения водородного топлива потребует около 65 млрд евро.

В промышленности ЕС также придерживается курса на сокращение использования углеродоемких водородных технологий на нефтеперерабатывающих заводах, в производстве аммиака и новых форм метанола. На первом этапе водород может полностью или частично заменить ископаемое топливо в производстве

---

<sup>23</sup> Australia exports world's first shipment of liquified hydrogen to Japan. URL: <https://www.globalaustralia.gov.au/news-and-resources/news-items/australia-exports-worlds-first-shipment-liquified-hydrogen-japan> (дата обращения: 01.06.2023).

<sup>24</sup> European Commission. Powering a climate-neutral economy: Commission sets out plans for the energy system of the future and clean hydrogen. 2020. URL: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_20\\_1259](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1259) (дата обращения: 30.07.2022).

стали. На втором металлургия ЕС полностью перейдет на производство безуглеродистой стали, с использованием «зеленого» водорода.

В России в настоящее время наиболее экономически эффективными и экологичными способами получения водорода считаются паровая конверсия метана и газификация угля (с обеспечением улавливания углекислого газа), а также электролиз воды с использованием дешевой энергии АЭС и ГЭС.

Рассмотренную в данном разделе информацию о стоимости транспортировки и производства водорода мы использовали в модельных оценках возможности развития рынка водородной электроэнергетики на территории нашей страны.

### **Модельные оценки развития водородной энергетики в России**

С одной стороны, моделирование рынка энергетики в настоящее время является актуальным в связи с ускоряющимся изменением климата [Smith et al., 2015]. С другой – исследований, посвященных именно водородной энергетике, довольно мало. Можно выделить работу китайских коллег [Guo et al., 2021], где рассматривается микромодель частичного равновесия на рынке водородной энергетики в Китае. В ее рамках оценивается взаимодействие между отдельными поставщиками и розничными продавцами, результирующее в равновесных параметрах на рынке. Однако большинство исследований по этой тематике используют макромоделли, в которых агрегированы регионы и отрасли [Blazejczak et al., 2014; Worowski, 2020].

В рамках данной работы нас интересует возможность перехода на водородное топливо в Российской Федерации, в связи с чем мы абстрагируемся от конкретных игроков и используем агрегированные значения на уровне регионов.

В основе нашего исследования лежит модель RUHOUR, которая представляет собой почасовую детализацию модели частичного равновесия RUTIMES (российской модификации модели TIMES) [Луговой и др., 2014]. Последняя часто используется для моделирования как глобальных [Vaillancourt et al., 2008], так и региональных энергетических рынков [Shi et al., 2016; Kannan & Turton, 2013; Vaillancourt et al., 2014] в контексте изменения климата и долгосрочного горизонта планирования.

Модель TIMES подходит для задач такого типа<sup>25</sup> благодаря тому, что, во-первых, учитывает не только производство энергии, но и такие факторы, как технология и транспортировка, во-вторых, позволяет проводить анализ различных сценариев, что особенно важно для долгосрочного прогнозирования. Еще одно ее преимущество – возможность частичного учета издержек, связанных с обеспечением балансовой устойчивости энергосистемы – за счет детальных почасовых расчетов.

Поскольку на данный момент производство, транспортировка и применение водорода для нужд транспорта не получили существенного распространения ни в одной стране мира, любое моделирование будет иметь допущения в части доступности и стоимости технологий. Мы в данной работе ввели предпосылку о том, что водород производится и потребляется в регионах без необходимости транспортировки.

Для оценки потенциала развития водородной энергетики была построена мультирегиональная модель генерации электроэнергии с помощью репрезентативной модели энергосистемы (РЭС) RUHOUR, реализованной на пакете energyRt<sup>26</sup>. Модель RUHOUR стремится удовлетворить экзогенно заданный конечный спрос на электроэнергию с учетом его региональной структуры, времени (с точностью до часа) и реальных погодных данных проекта MERRA2 NASA<sup>27</sup>. Модель RUHOUR является частью модели RUHIREs, описанной во многих публикациях Scopus & WoS [Golub et al., 2019; Potashnikov et al., 2022; Бердин и др., 2020].

По сравнению с прошлыми версиями модели существенно расширено число регионов, а наиболее крупные из них были разделены на части. Некоторые подрегионы были исключены из рассмотрения после анализа наиболее вероятных мест для размещения солнечных (СЭС) и ветровых (ВЭС) электростанций. Топология модели содержит два типа регионов: те, которые могут только генерировать электроэнергию СЭС и ВЭС (при этом

---

<sup>25</sup> *Loulou R., Goldstein G., Kanudia A., Lettita A., Remme U.* Documentation for the times model part I. Energy Technology Systems Analysis Programme. 2016. URL: [https://iea-etsap.org/docs/Documentation\\_for\\_the\\_TIMES\\_Model-Part-I\\_July-2016.pdf](https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I_July-2016.pdf) (дата обращения: 30.08.2022).

<sup>26</sup> EnergyRt: energy systems modeling toolbox in R. URL: <https://energyrt.org/> (дата обращения: 30.08.2022).

<sup>27</sup> MERRA 2. URL: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/> (дата обращения: 30.08.2022).

спрос на водородное топливо для транспорта в них отсутствует), и те, в которых помимо этого есть детальный, почасовой спрос на электроэнергию, по данным АО «Системный оператор ЕЭС»<sup>28</sup>, а также потенциальный спрос на водород для нужд транспорта. Последний оценивался по данным формы Росстат 4ТЭР<sup>29</sup>, с учетом прогнозных значений Минэкономразвития России<sup>30</sup>.

Нам не удалось найти убедительных оценок изменения спроса на водородный транспорт, поэтому для модельных расчетов использованы прогнозы Минэкономразвития России об изменении общего спроса на автотранспорт. Мы предполагаем, что он может быть сформирован в том числе за счет водородного транспорта в случае его экономической эффективности.

Авторы произвели симуляцию оптимальной сети генерации электроэнергии с учетом сохранения текущего спроса на электроэнергию, потенциального спроса на водород (при условии, что он может быть использован только в том регионе, где произведен), а также неопределенности издержек (табл. 3), используя ставку дисконтирования  $U$  (5%, 15%). Все издержки, кроме цен на газ, варьируются с помощью  $e^{U(-0,5,0,5)}$ .

Результаты анализа представлены графически. На рисунке 1 показано предложение водорода, в зависимости от цены на него и ряда различных факторов: цены природного газа, ставки дисконтирования, стоимости технологий. При цене менее 0,5 долл. за кг  $H_2$ , что эквивалентно, с учетом разных удельных расходов, 0,05 долл. за литр бензина – генерация водорода маловероятна. При цене более 2 долл./кг (~0,2 долл./л бензина) вероятней всего весь конечный спрос на водород может быть удовлетворен.

---

<sup>28</sup> Системный оператор единой энергетической системы. URL: <https://www.sops.ru/> (дата обращения: 30.08.2022). В рамках базы данных отсутствует информация о спросе на электроэнергию в изолированных энергосистемах, в частности, Камчатского края, Сахалинской области, Магаданской области и Чукотского автономного округа.

<sup>29</sup> Единый архив экономических и социологических данных. URL: <http://sophist.hse.ru/> (дата обращения: 30.08.2022).

<sup>30</sup> Минэкономразвития РФ. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года. 2020. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/a5f3add5deab665b344b47a8786dc902/prognoz2036.pdf> (дата обращения: 27.08.2022). Спрос рассчитывался, исходя из объема водорода, необходимого для удовлетворения конечного спроса на перевозки в 2019 г., с увеличением спроса на 50%, и разным расходом топлива на 100 км: 7,5 л на 100 км, против 750 г водорода на 100 км.

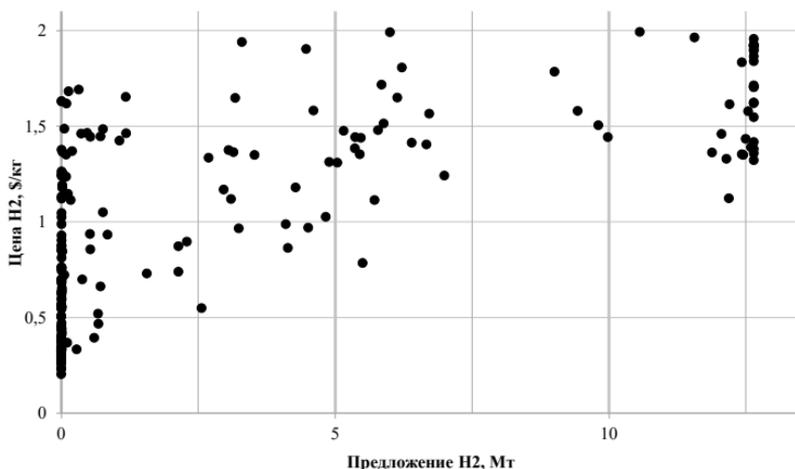
Таблица 3. Капитальные издержки и технические параметры моделируемых технологий

| Технологии                   | Капитальные издержки   | Технический параметр   |
|------------------------------|--|--|
| СЭС                          | \$825/КВт  | КИУМ (коэффициент использования установленной мощности) солнечной энергии варьирует в пределах 9–30% в зависимости от местоположения и оценивается с использованием модели плоскости решетки Sandia и алгоритмов для одноосевого трекера солнечной батареи 30 лет <sup>(1)</sup>               |
| ВЭС                          | \$1050/КВт   | КИУМ ветровой энергии может варьировать от 25 до 61% в зависимости от местоположения станции, при этом точные данные рассчитываются с использованием пакета metra2ools со сроком службы 20 лет. Скорости ветра для высоты 150 м были аппроксимированы значениями на 10 м и 50 м <sup>(2)</sup> |
| Газовые электростанции       | \$700/КВт, стоимость природного газа 50–250\$/тыс.м <sup>3</sup> | КПД 56%*   |
| Батареи                      | \$250/МВт · ч  | Скорость разрядки 0,025%, КПД зарядки 95% <sup>(3)</sup>   |
| Сети передачи электроэнергии | \$0,87 млн за 1 км, для 2,4 ГВт                                  | Потери варьируют от 2,5% до 7,2% в зависимости от расстояния между регионами** (потери = 0,6% + 2,9% на каждые 1000 км) <sup>(4)</sup>   |
| Зеленый водород              | \$335/КВт, стоимость технической воды \$0,021/кг H <sub>2</sub>  | КПД 67%  |

**Примечание.** \* Необходимо учесть, что тепло стоит дешевле, чем электроэнергия, и ТЭЦ вытесняются в рыночных экономиках электростанциями и котельными из-за экономической неэффективности. Отсюда следует, что различие между особенностями текущих ТЭЦ и используемых в работе электростанций незначительно влияет на результат. Различия между новыми ТЭЦ и электростанциями в работе также незначительны, так как электростанции более предпочтительны по сравнению с ними. \*\* Мы предполагали, что нужно строить дополнительные ветки сетей для передачи ВИЭ от источников до центра регионов. Сведения о конкретном местоположении сетей передачи электроэнергии засекречены, так как они считаются стратегически важной инфраструктурой, из-за чего данное предположение необходимо.

**Источник.** Составлено авторами на основе данных: (1) Sandia National Laboratories, PV Performance Modeling Collaborative. 2021. URL: <https://pvpmc.sandia.gov/> (дата обращения: 30.08.2022); (2) Минэкономразвития РФ. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года. 2020; (3) Минэкономразвития РФ. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года. 2020; (4) Sandia National Laboratories, PV Performance Modeling Collaborative. 2021. URL: <https://pvpmc.sandia.gov/>, а также Lazard. Lazard Levelized Cost of Hydrogen Analysis 2.0. 2021. URL: <https://www.lazard.com/media/451922/lazards-levelized-cost-of-hydrogen-analysis-version-20-vf.pdf>; International Renewable Energy Agency. Green hydrogen cost reduction. 2020. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA\\_Green\\_hydrogen\\_cost\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf) (дата обращения: 30.08.2022).

При интерпретации результатов нужно иметь в виду, что в них не учтены издержки доставки и продажи водорода конечным потребителям, но в целом они не должны оказать существенное влияние на модельные оценки, так как транспортировка предполагается в пределах одного региона. По нашим расчетам (на основе данных Bloomberg)<sup>31</sup>, транспортные издержки в таком случае не превысят 0,8 долл. за литр в бензиновом эквиваленте.



Источник рис. 1, 2. Расчеты авторов.

Рис. 1. Чувствительность предложения водорода к цене

Развитие рынка «зеленого» водорода может повлиять на конечную цену электроэнергии. С одной стороны, рост спроса на электроэнергию для генерации водорода может повысить конечную цену за счет истощения наиболее рентабельных локаций СЭС и ВЭС. С другой – постройка дополнительных мощностей СЭС и ВЭС может обеспечить стабильное увеличение предложения от данных источников за счет регулирования загрузки электролизеров, если это будет поддержано строительством электрических сетей. Это может снизить необходимость установки батарей.

<sup>31</sup> Bloomberg Finance L.P. Hydrogen Economy Outlook. 2020. URL: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf> (дата обращения: 29.08.2022).

На рисунке 2 сравниваются цены генерации электроэнергии при наличии производства «зеленого» водорода и без него. По оси ординат показана стоимость электроэнергии, когда генерация зеленого водорода происходит, а по оси абсцисс – когда нет. Если точка находится ниже биссектрисы, производство «зеленого» водорода снижает цены на электроэнергию, а если выше, – наоборот. Как отчетливо видно на рисунке, в большинстве регионов развитие водородной энергетики на основе ВИЭ может позволить как снизить конечную цену электроэнергии, так и оставить ее прежней. Рост цены, напротив, менее вероятен.

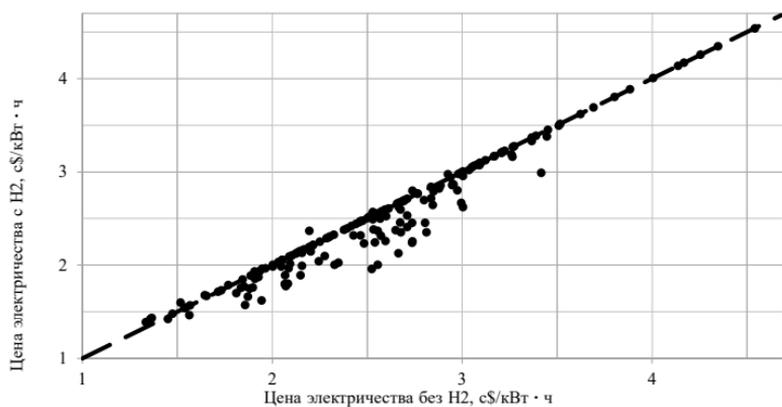


Рис. 2. Сравнение цены генерации электроэнергии при наличии развития водородного рынка и без него

Несмотря на приведенные расчеты, показывающее возможность удовлетворения спроса на водородное топливо и его экономическую привлекательность для конечного потребителя, стоит учитывать, что в основе моделирования лежат внешние оценки некоторых показателей. Во многих из них заложены довольно оптимистичные прогнозы развития технологий, которые не всегда подтверждаются другими авторами<sup>32</sup>. Поэтому допускается наличие некоторых погрешностей в полученных оценках. Тем не менее результаты исследования подтверждают возможность перехода российского автотранспорта на водородное топливо при

<sup>32</sup> The Oxford institute for energy studies. Hydrogen storage for a net-zero carbon future. 2023. URL: <https://www.oxfordenergy.org/publications/hydrogen-storage-for-a-net-zero-carbon-future/> (дата обращения: 18.06.2023).

определенных условиях, а также демонстрируют синергетический эффект от развития солнечной и ветровой электроэнергии и водородного топлива за счет сокращения издержек на балансировку.

## **Выводы**

Использование водорода предоставляет одну из перспективных альтернатив декарбонизации транспорта и сокращения вредных выбросов, к чему стремятся многие страны мира, включая Россию. Традиционный транспорт с ДВС может быть заменен электрическим или водородным в случае, если для его эксплуатации будут созданы необходимые условия, а цена будет привлекательной для потребителей. При этом с точки зрения стабильности эксплуатации у водородных автомобилей есть ряд преимуществ по сравнению с электрокарами.

В рамках данной статьи нами была поставлена задача оценить, может ли водородное топливо быть экономически выгодным для потребителей, а также существуют ли возможности для его производства в России для удовлетворения потенциального спроса со стороны автотранспорта (при оценке последнего мы воспользовались прогнозами роста автомобильного транспорта в целом без выделения водородного из-за его возможной зависимости от других показателей, которые не учитывались в модели).

Анализ текущего состояния и перспектив производства и применения водорода для нужд транспортной отрасли в России выявил отсутствие условий, обеспечивающих интерес промышленности к производству водорода, помимо удовлетворения нужд нефтегазового сектора. Анализ ценовой чувствительности показал, что при цене менее 0,5 долл. за кг  $H_2$ , генерация водорода маловероятна. При цене более 2 долл./кг появляются экономические стимулы для полного удовлетворения конечного спроса на водород. Транспортировка водорода до конечного потребителя может добавить к его стоимости 0,65–4 долл./кг, что все еще оставляет водород конкурентоспособным.

Развитие производства и рынка водородного топлива может позволить России не только ускорить достижение национальной цели «Комфортная и безопасная среда для жизни», где в качестве одной из подзадач фигурирует «снижение выбросов опасных загрязняющих веществ, оказывающих наибольшее негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека, в два раза». Это также дает потенциальную возможность занять

нишу с относительно низкой (на данный момент) конкуренцией на мировом энергетическом рынке, что положительно скажется на развитии новых технологий и высокотехнологичных отраслей экономики в целом, а они, в свою очередь, способны оказать мультипликационный эффект на экономику и стать драйверами посткризисного восстановления.

## Литература / References

Луговой О.В., Поташников В.Ю., Гордеев Д.С. Прогнозы энергобаланса и выбросов парниковых газов на модели RU-TIMES до 2050 года // Научный вестник ИЭП им. Гайдара. 2014. № 5. С. 39–43.

Lugovoi, O.V., Potashnikov, V. Yu., Gordeev, D.S. (2014). Forecasts of the energy balance and greenhouse gas emissions on the RU-TIMES model up to 2050. *Scientific Bulletin of E.T. Gaidar Institute of Economic Policy*. No. 5. Pp. 39–43. (In Russ.).

Бердин В.К., Кокорин А.О., Поташников В.Ю., Юлкин Г.М. Развитие ВИЭ в России: потенциал и практические шаги // Экономическая политика. 2020. Т. 15. № 2. С. 106–135. DOI: 10.18288/1994–5124–2020–2–106–135

Berdin, V.K., Kokorin, A.O., Potashnikov, V.Yu., Yulkin, G.M. (2020). Potential Possibilities and Practical Steps for Renewable Energy Development in Russia. *Ekonomicheskaya politika*. Vol. 15. No. 2. Pp. 106–135. (In Russ.). DOI: 10.18288/1994–5124–2020–2–106–135,

Blazejczak J., Braun, F.G., Edler, D., Schill, W.F. (2014). Economic effects of renewable energy expansion: A model-based analysis for Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 40. Pp. 1070–1080. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.134

Borowski, P.F. (2020). Zonal and Nodal Models of Energy Market in European Union. *Energies*. Vol. 13. No. 16. DOI: 10.3390/en13164182

Crippa, M., Guizzardi, D., Solazzo, E., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Banja, M., Olivier, J.G.J., Grassi, G., Rossi, S., Vignati, E. (2021). *GHG emissions of all world countries*. Publications Office of the European Union. DOI: 10.2760/173513

Fan, J.L., Yu, P., Li, K., Xu, M., Zhang, X. (2020). A leveled cost of hydrogen (LCOH) comparison of coal-to-hydrogen with CCS and water electrolysis powered by renewable energy in China. *Energy*. Vol. 242. DOI: 10.1016/j.energy.2021.123003

Golub, A., Lugovoy, O., Potashnikov, V. (2019). Quantifying barriers to decarbonization of the Russian economy: real options analysis of investment risks in low-carbon technologies. *Climate Policy*. Vol. 19. No. 6. Pp. 716–724. DOI: 10.1080/14693062.2019.1570064

Guo, Z., Wei, W., Chen, L., Zhang, X., Mei, S. (2021). Equilibrium model of a regional hydrogen market with renewable energy based suppliers and transportation costs. *Energy*. Vol. 220. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119608

Kannan, R., Turton, H. (2013). A Long-Term Electricity Dispatch Model with the TIMES Framework. *Environmental Modeling & Assessment*. Vol. 18. Pp. 325–343. DOI: 10.1007/s10666–012–9346-y

Potashnikov, V., Golub, A., Brody, M., Lugovoy, O. (2022). Decarbonizing Russia: Leapfrogging from Fossil Fuel to Hydrogen. *Energies*. Vol. 15. No. 3. DOI: 10.3390/en15030683

Sen A., Miller J. (2022). Emissions reduction benefits. *Working Paper*. Available at: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/03/Accelerated-ZEV-transition-wp-final.pdf> (дата обращения: 30.08.2022).

Shi, J., Chen, W., Yin, X. (2016). Modelling building's decarbonization with application of China TIMES model. *Applied Energy*. Vol. 162. Pp. 1303–1312. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.06.056

Smith, J.S., Edmonds, J., Hartin, C.A., Mundra, A., Calvin, K. (2015). Near-term acceleration in the rate of temperature change. *Nature Climate Change*. Vol. 5. No. 4. Pp. 333–336. DOI: 10.1038/nclimate2552

Vaillancourt, K., Alcocer, Y., Bahn, O., Fertel, C., Frenette, E., Garboui, H., Kanudia, A., Labriet, M., Loulou, R., Marcy, M., Neji, Y., Waaub, J.P. (2014). A Canadian 2050 energy outlook: Analysis with the multi-regional model TIMES-Canada. *Applied Energy*. Vol. 132. Pp. 56–65. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.06.072

Vaillancourt, K., Labriet, M., Loulou, R., Waaub, J.P. (2008). The role of nuclear energy in long-term climate scenarios: An analysis with the World-TIMES model. *Energy Policy*. Vol. 36. No. 7. Pp. 2296–2307. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.01.015

Статья поступила 17.04.2023

Статья принята к публикации 18.06.2023

**Для цитирования:** Поташиников В.Ю., Барينوва В.А., Леваков П.А., Бердин В.Х., Юлкин Г.М. Оценка взаимных положительных эффектов от развития солнечной и ветровой электроэнергии и водородного транспорта // ЭКО. 2023. № 9. С. 173–192. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2023-9-173-192

### Информация об авторах

*Поташиников Владимир Юрьевич* (Москва) – Лаборатория исследований проблем устойчивого развития Института прикладных экономических исследований РАНХиГС.

E-mail: potashnikov.vu@gmail.com; ORCID: 0000-0001-9237-3100

*Барينوва Вера Александровна* (Москва) – кандидат экономических наук. Лаборатория исследований проблем устойчивого развития Института прикладных экономических исследований РАНХиГС.

E-mail: barinova-va@ranepa.ru; ORCID: 0000-0002-9596-4683

*Леваков Павел Александрович* (Москва) – Лаборатория исследований проблем устойчивого развития Института прикладных экономических исследований РАНХиГС.

E-mail: levakov-pa@ranepa.ru; ORCID: 0000-0003-4731-5766

*Бердин Владимир Хакимович* (Москва) – АНО «Международный центр устойчивого энергетического развития» под эгидой ЮНЕСКО.

E-mail: vberdin@gmail.com; ORCID: 0000-0002-8755-3454

*Юлкин Григорий Михайлович* (Москва) – АНО «Международный центр устойчивого энергетического развития» под эгидой ЮНЕСКО.

E-mail: grigory.yulkin@gmail.com; ORCID: 0000-0001-6385-866X

**For citation:** Potashnikov, V. Yu., Barinova, V.A., Levakov, P.A., Berdin, V. Kh., Yulkin, G.M. (2023). Assessment of Mutual Benefits of Solar and Wind Electricity Development and Hydrogen Transportation. *ECO*. No. 9. Pp. 173–192. (In Russ.). DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2023-9-173-192

## Summary

*V.Yu. Potashnikov, V.A. Barinova, P.A. Levakov, V.Kh. Berdin, G.M. Yulkin*  
**Assessment of Mutual Benefits of Solar and Wind Electricity Development and Hydrogen Transportation**

**Abstract.** The paper examines various practices of developing and adopting technologies of production, transportation, storage and usage of hydrogen in the developed countries. The experience of leading countries of the world in the field of development and application of technologies of hydrogen production, transportation, storage and use is considered. The primary economic and social factors of hydrogen energy development and its role in achieving long-term goals of countries in terms of greenhouse gas emissions are highlighted. The potential of “green” hydrogen for transportation needs in Russia, including its impact on electricity prices, was assessed with the aid of a highly detailed model of the representative energy system RUHOUR. Sensitivity analysis showed that at a price of more than \$2 per kgH<sub>2</sub> (~\$0.2 per liter of gasoline), it is most likely that the entire potential demand for hydrogen can be met. The development of large-scale green hydrogen generation infrastructure in Russia can help reduce greenhouse gas emissions, accelerate diversification of the export structure, and reduce electricity prices for end users.

**Keywords:** *decarbonization; hydrogen; RUHOUR; RPS; transport development; solar energy; wind energy*

## Information about the authors

*Potashnikov, Vladimir Yurievich* (Moscow) – Laboratory for Sustainable Development Studies of RANEPА.

E-mail: potashnikov.vu@gmail.com; ORCID: 0000–0001–9237–3100

*Barinova, Vera Aleksandrovna* (Moscow) – PhD in Economics. Laboratory for Sustainable Development Studies of RANEPА.

E-mail: barinova-va@ranepa.ru; ORCID: 0000–0002–9596–4683

*Levakov, Pavel Aleksandrovich* (Moscow) – Laboratory for Sustainable Development Studies of RANEPА.

E-mail: levakov-pa@ranepa.ru; ORCID: 0000–0003–4731–5766

*Berdin, Vladimir Khakimovich* (Moscow) – International Sustainable Energy Development Centre Under the Auspices of UNESCO.

E-mail: vberdin@gmail.com; ORCID: 0000–0002–8755–3454

*Yulkin, Grigory Mikhailovich* (Moscow) – International Sustainable Energy Development Centre Under the Auspices of UNESCO.

E-mail: grigory.yulkin@gmail.com; ORCID: 0000–0001–6385–866X