

МРНТИ 29.19.16: 29.19.22: 29.19.31:

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2026-155-2-92-105>

Фотоэлектрохимические пути к зелёному водороду: анализ, обзор и форсайт

**Е.В. Шевченко¹, Н.Б. Бакранов^{1,2}, Б.Ж. Сейтов^{2,4}
А.С. Серикканов¹, Д.И. Бакранова^{2,3*}, С.А. Пазылбек⁵**

¹Национальная академия наук Республики Казахстан при Президенте Республики Казахстан, Алматы, Казахстан

²«Research Group altAir nanolab», Алматы, Казахстан

³SDU University, Каскелен, Казахстан

⁴Международный казахско-турецкий университет имени Х.А. Ясави, Туркестан, Казахстан

⁵Университет имени Ж.А. Ташенева, Шымкент, Казахстан

*E-mail: yelenashevchenko@gmail.com, bakranov@gmail.com, bekbolat.seitov@ayu.edu.kz,
a.serikkanov.nas@gmail.com, dinabakranova@gmail.com, sapargali.pa@gmail.com*

Аннотация. Современная динамика декарбонизации выявляет структурные ограничения существующих моделей производства водорода. Технично-экономические оценки показывают, что ключевым фактором себестоимости зелёного водорода остаётся энергопотребление, тогда как темпы наращивания мощностей электролиза не соответствуют траекториям достижения углеродной нейтральности. Несмотря на рост установленной мощности электролизёров с приблизительно 0,1 ГВт в 2020 г. до 1,75 ГВт в 2023 г., значительная часть заявленных проектов не достигает стадии окончательного инвестиционного решения, а инфраструктурные ограничения сохраняются.

Целью настоящего исследования является системный анализ эволюции фотоэлектрохимических (ПЕС) технологий производства водорода и оценка их потенциала в формирующейся архитектуре низкоуглеродной энергетики. Фотоэлектрохимическое водоразложение рассматривается как альтернативная технологическая конфигурация, объединяющая светопоглощение полупроводником и электрохимическое расщепление воды в единой системе, что позволяет реализовать локальную генерацию водорода и снизить уязвимости цепочек поставок по сравнению с централизованными схемами электролиза.

Методология исследования основана на комплексном системном анализе, включающем обобщение материаловедческих данных, библиометрических показателей и патентной динамики. Проанализирована взаимосвязь между пороговыми значениями эффективности преобразования солнечной энергии в водород, ограничениями стабильности материалов и инновационными траекториями развития оксидных, нитридных, халькогенидных и гибридных фотоэлектродов. В качестве основного результата предложена прогнозная дорожная карта развития ПЕС-техно-

Поступила 11.03.2026. После доработки 10.04.2026. Принята к печати 10.04.2026. Доступно онлайн 30.06.2026

*автор для корреспонденции

логий до 2035 года, ориентированная на замещение благородных металлов, повышение промышленной совместимости и интеграцию в распределённую водородную инфраструктуру. Научная ценность работы заключается в формировании целостного представления о долгосрочном потенциале PEC как комплементарной технологии водородной энергетики, а практическое значение связано с возможностью использования полученных выводов при стратегическом и технологическом планировании систем производства зелёного водорода.

Ключевые слова: Фотоэлектрохимическое водоразложение; зелёный водород; PEC-материалы; полупроводниковые фотоэлектроды; solar-to-hydrogen эффективность; библиометрический анализ; водородная инфраструктура

Введение

Ключевым ограничением масштабирования зелёного водорода остаётся его энергоёмкость, напрямую определяющая экономическую эффективность производства [1, 2]. Одновременно мировой спрос на водород вырос с 70 Мт в 2019 году до примерно 97 Мт в 2023 году, при этом доля низкоуглеродного водорода остаётся ниже 1 %, а сопутствующие выбросы достигают порядка 920 Мт CO₂ [3, 4]. Для соответствия климатическим целям объём низкоуглеродного производства должен увеличиться до порядка 49 Мт к 2030 году [1, 4], что требует не только роста спроса, но и замещения углеродоёмких технологий производства [5].

Электролиз на основе возобновляемых источников энергии является основным направлением декарбонизации. Установленные мощности выросли в период 2020–2023 гг. [6, 7], однако лишь небольшая часть проектов достигла стадии окончательного инвестиционного решения. Даже при оптимистичных сценариях к 2030 году ожидается 230–375 ГВт, что существенно ниже примерно 550 ГВт, необходимых для сценария достижения нулевых выбросов [4]. Дополнительные барьеры включают капиталоемкость инфраструктуры хранения и транспорта, зависимость от критических материалов и инвестиционную неопределённость.

Регуляторные подходы различаются по регионам. В США стимулирование осуществляется через налоговые механизмы, тогда как Европейский союз расширил нормативную базу в рамках Hydrogen and Decarbonised Gas Market Package, распространив её на возобновляемый и низкоуглеродный водород [8]. Тем не менее существующие меры не устраняют системных ограничений, что усиливает интерес к альтернативным солнечно-ориентированным маршрутам.

Фотоэлектрохимическое водоразложение основано на прямом сопряжении процессов поглощения фотонов и каталитических окислительно-восстановительных реакций в единой полупроводниковой структуре [9, 10]. Возможность локальной генерации водорода из солнечного излучения и воды позволяет потенциально минимизировать логистические риски, характерные для централизованных водородных цепочек поставок [11].

С теоретической точки зрения предельная эффективность solar-to-hydrogen для PEC-систем достигает 47,3 %, однако для положительного энергетического баланса необходимы значения не ниже 3–5%, а для коммерческого внедрения - порядка 10 % и выше [12]. Интеграция функций светопоглощения и катализа в одном устройстве может снизить системную сложность по сравнению с электролизом, питаемым внешним источником энергии [1, 13]. В то же время уровень технологической готовности остаётся низким вследствие проблем стабильности, рекомбинационных потерь и масштабируемости [14].

Современные направления исследований включают разработку наноструктурированных гетероинтерфейсов, защитных покрытий, плавающих фотокаталитических систем, а также применение цифрового моделирования и методов машинного обучения для ускорения поиска оптимальных материалов [15]. Однако переход от лабораторных образцов к промышленным устройствам требует смещения акцента от рекордных показателей эффективности к вопросам технологической воспроизводимости, долговечности и интеграции в распределённые энергетические системы [16].

Механизм PEC-водоразложения

Фотоэлектрохимическое расщепление воды представляет собой процесс прямой трансформации солнечного излучения в химическую энергию водорода. Конструктивно PEC-ячейка включает полупроводниковый фотоанод и/или фотокатод, контактирующие с электролитом [17]. Ключевая особенность системы заключается в совмещении светопоглощения и электрохимических реакций в единой межфазной структуре.

Энергетическое соответствие зонной структуры полупроводника редокс-потенциалам воды определяет принципиальную возможность протекания реакций. Валентная зона должна располагаться более положительно относительно потенциала окисления воды (+1,23 В vs. RHE), тогда как зона проводимости — более отрицательно потенциала восстановления водорода (0 В vs. RHE). С учётом перенапряжений практически реализуемая ширина запрещённой зоны составляет порядка 1,5-1,8 эВ.

Функционирование системы можно рассматривать как совокупность трёх взаимосвязанных стадий: генерация носителей заряда под действием света, их пространственное разделение и транспорт, а также межфазные окислительно-восстановительные реакции [18].

При формировании контакта полупроводника с электролитом возникает твёрдо-жидкостный переход, сопровождающийся перераспределением зарядов и выравниванием уровней Ферми рабочего электрода, электролита и противоиэлектрода [19]. В результате формируется область пространственного заряда в объёме полупроводника и двойной электрический слой в растворе.

Поглощение фотонов с энергией, превышающей ширину запрещённой зоны, инициирует переход электрона из валентной зоны в зону проводимости, что сопровождается образованием дырки. Возникающие электрон-дырочные пары создают квазиуровни Ферми и внутреннее электрическое поле, способствующее их разделению [20]. Эффективность устройства во многом определяется вероятностью достижения носителями межфазной границы до рекомбинации.

В n-типе фотоанодов дырки мигрируют к поверхности и инициируют реакцию выделения кислорода, тогда как электроны через внешнюю цепь поступают к катоду. В р-типе фотокатодов, напротив, фотогенерированные электроны участвуют в реакции выделения водорода непосредственно на поверхности электрода. Дополнительное пространственное разделение носителей может усиливаться гетеропереходами и встроенными электрическими полями [18, 21].

Полуреакции, протекающие на границе раздела фаз, описываются следующими уравнениями:



Для самопроизвольного протекания процесса энергетические уровни полупроводника должны обеспечивать достаточное фотонапряжение для одновременного инициирования обеих реакций.

Реальная эффективность PEC ограничивается совокупностью потерь, среди которых объёмная рекомбинация носителей, поверхностная рекомбинация на дефектах, кинетические барьеры межфазных реакций, необходимость преодоления перенапряжений, а также фотокоррозия и деградация материала при длительном освещении и приложенном потенциале.

Для минимизации этих потерь применяются стратегии инженерной модификации, включающие регулирование зонной структуры путём легирования и формирования твёрдых растворов, создание гетероструктур для усиления разделения зарядов, нанесение сокатализаторов для ускорения межфазной кинетики, использование защитных оксидных покрытий для повышения стабильности, а также наноструктурирование поверхности с целью сокращения диффузионной длины носителей и увеличения активной площади реакции.

Таким образом, механизм PEC-водоразложения определяется балансом четырёх взаимосвязанных факторов: спектральной эффективности светопоглощения, динамики транспорта носителей заряда, скорости межфазных электрохимических реакций и устойчивости материала в рабочей среде. Оптимизация каждого из этих компонентов является необходимым условием перехода от лабораторных прототипов к практически применимым системам.

Библиометрический и форсайт-анализ

Даже самые эффективные материалы и архитектуры остаются научно интересными, но коммерчески нерелевантными без надёжной интеграции на уровне системы. Как отмечают Brown и соавт. [22], энергосистемы с доминирующей долей переменных возобновляемых источников будут всё чаще сталкиваться с продолжительными периодами нулевых или отрицательных цен и высокой волатильности. В таких условиях PEC-системы должны развиваться синхронно с инфраструктурой хранения и компримирования водорода, ионообменными мембранами, системами теплового менеджмента и рекуперации отходящего тепла, а также технологиями предварительной подготовки воды [23]. Современные форсайт-исследования также недостаточно учитывают системные риски, включая сырьевую безопасность, инфляционное давление и социальное принятие технологий. В более широком контексте масштабирование PEC-технологий определяется не только технологической зрелостью, но и уровнем общественного восприятия водородной энергетики. Вопросы безопасности хранения и использования водорода,

а также необходимость адаптации существующей энергетической инфраструктуры могут влиять на скорость внедрения распределённых решений.

Дополнительно инфляционное давление на критические материалы, компоненты установок и логистические цепочки способно существенно изменить экономику PEC-систем, снижая их конкурентоспособность по сравнению с традиционным электролизом в краткосрочной перспективе. В этой связи дальнейшие исследования должны учитывать не только материалы и устройства, но и макроэкономические и институциональные факторы [24, 25]. Следовательно, необходим системный подход: даже лучшие PEC-электроды остаются неэффективными без интеграции в цепочки создания стоимости водорода.

Замещение благородных металлов доступными катализаторами, включая нанокристаллический CoO и металсиллициды [26, 27], может существенно снизить стоимостные барьеры внедрения PEC-технологий. Хотя показатели эффективности могут быть умеренными, доступность, масштабируемость и совместимость этих катализаторов с крупноформатными устройствами делают их привлекательными для промышленного применения.

Разрыв между лабораторными достижениями и практическим внедрением обусловлен прежде всего инженерией системного уровня: интеграцией PEC-модулей с системами разделения водорода, циркуляции электролита и теплового регулирования. Ограниченное число патентов в этой области подчёркивает необходимость смещения фокуса инноваций от материаловедения к разработке устройств и демонстрационных образцов.

Библиометрическое картирование исследований PEC

Для выявления перспективных направлений исследований было проведено тематическое моделирование более чем 6 000 аннотаций Web of Science (2015-2025 гг.) с использованием метода Latent Dirichlet Allocation (LDA). На рисунке 1 представлена временная тепловая карта весов тематических кластеров, полученных на основе LDA-моделирования.



Рисунок 1. Тепловая карта годовых весов тематик в исследованиях PEC-водородной генерации (2015–2025). Тепловая карта демонстрирует ежегодную динамику исследовательского акцента по десяти темам, выделенным методом LDA в области PEC-водоразложения. Более тёплые цвета соответствуют большей значимости темы в конкретный год.

Каждая строка отражает отдельный тематический кластер (например, Hydrogen & PEC Efficiency, TiO₂ & Charge Transfer и др.), а каждый столбец соответствует году публикации. Интенсивность цвета указывает на относительную значимость (вес) темы в конкретный год, причём более тёмные оттенки соответствуют более высокой активности.

Примечательно, что тема Water Oxidation Mechanisms демонстрирует наиболее устойчивый и значительный рост с пиком в 2024 году. В противоположность этому направления Quantum Dots & WS₂/CdS, Fe₂O₃ и легирование металлами остаются относительно стагнирующими или демонстрируют снижение активности в последние годы. Наблюдаемое снижение активности ряда тематик к 2025 году может быть обусловлено как насыщением исследовательских направлений, так и перераспределением научного финансирования в пользу новых материалов и гибридных архитектур. В частности, усиление интереса к тандемным PEC-PV системам и нитридным полупроводникам приводит к относительному снижению доли традиционных оксидных систем в публикационном потоке. Данная временная карта отражает эволюцию исследовательских приоритетов и позволяет выделить как зрелые, так и формирующиеся направления в PEC-водородной генерации (таблица 1), где наиболее быстро растущая тема - Механизмы окисления воды, рост с 38 (2015) до 164 (2024), затем снижение до 120 (2025); формирующееся направление - Поглощение видимого света, рост в период 2020–2024 гг., отражающий усиление интереса к регулированию ширины запрещённой зоны; снижающиеся темы - Тонкие плёнки, и температура, и Fe₂O₃, и легирование металлами показывают устойчивое снижение после 2019 года; стабильные направления - Водород, эффективность PEC, Фототок и производительность сохраняют умеренно высокий интерес на протяжении десятилетия.

Следует отметить, что показатель «рост (Δ веса)» отражает не абсолютное изменение числа публикаций, а изменение нормализованного веса темы, рассчитанного в рамках LDA-модели. Данный показатель учитывает относительную значимость темы в корпусе аннотаций и может не совпадать с разностью абсолютных значений, приведённых для иллюстрации динамики.

Таблица 1. Временная динамика роста тематик в PEC-водоразложении (2015–2025)

Ранг	Название темы	Ключевые слова темы (основные термины)	Рост (Δ веса)
1	Механизмы окисления воды	water, oxidation, mechanism, O ₂ , oxygen, catalyst	+82.52
2	Поглощение видимого света	visible, light, absorption, bandgap, spectrum	+30.88
3	Фототок и производительность	photocurrent, performance, density, stability, enhancement	+29.33
4	Катализаторы и интеграция PEC	catalyst, interface, cocatalyst, tandem, integration	+23.73
5	TiO ₂ и перенос заряда	TiO ₂ , charge, transfer, electron, carrier	+18.77
6	Водород и эффективность PEC	hydrogen, efficiency, STH, production, solar-to-hydrogen	+3.55
7	Квантовые точки и WS ₂ /CdS	quantum, dot, QDs, CdS, WS ₂	+0.73
8	Fe ₂ O ₃ и легирование металлами	Fe ₂ O ₃ , doping, metal, hematite, transition	-2.42
9	Спектроскопия и CuO	spectroscopy, CuO, signal, fluorescence, spectrum	-12.16
10	Тонкие плёнки и температура	thin film, substrate, phase, temperature, crystallinity	-16.94

Для выявления перспективных исследовательских траекторий временное тематическое моделирование было дополнено библиометрическим сетевым анализом, что позволило отразить как динамику тем во времени,

так и структурные взаимосвязи между ключевыми материалами. Если тепловая карта на рисунке 1 демонстрирует изменение значимости тематических кластеров в период 2015–2025 гг., то карта совместной встречаемости терминов, построенная в VOSviewer (рисунок 2), отражает структурную организацию исследований PEC-водородного разложения. Размер узла соответствует частоте использования термина, цвет обозначает тематическую кластеризацию, а толщина связей отражает силу совместной встречаемости.

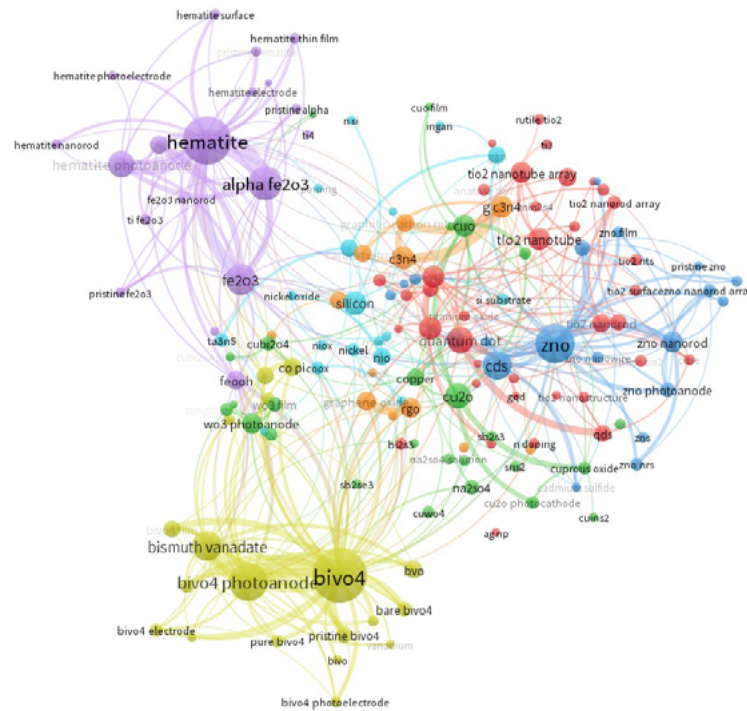


Рисунок 2. Организация материалов и концепций в исследовательском ландшафте PEC

Крупные и плотно связанные узлы, такие как Fe_2O_3 и TiO_2 , отражают хорошо сформированные, но ограниченные по эффективности направления, характеризующиеся большим объёмом публикаций при умеренных темпах роста. BiVO_4 выступает центральным хабом, демонстрируя сильные связи с WO_3 , Cu_2O и углеродсодержащими модификаторами, что подчёркивает его статус одной из наиболее активно оптимизируемых платформ фотоанодов.

Параллельно кластеры, центрированные вокруг ZnO , CdS и квантовых точек, указывают на продолжающийся интерес к наноструктурированным архитектурам и гетеропереходам для улучшения переноса заряда и светопоглощения.

Меньшие кластеры, связанные с кремнием, GaN , Ta_3N_5 и перовскитами, представляют быстрорастущие, но ещё формирующиеся области, что указывает на их потенциал для тандемных и гибридных PEC/PV-решений. Углеродный нитрид и оксид графена выступают связующими элементами между зрелыми оксидными системами и новыми гибридными архитектурами, отражая точки концептуальной конвергенции.

С форсайт-позиции двойной подход к картированию подчёркивает одновременную зрелость традиционных оксидных фотоэлектродов и ускоряющуюся диверсификацию в сторону нитридов, перовскитов и углеродных полупроводников. Эти выводы имеют значение для построения сценариев: зрелые материалы вероятно будут использоваться в демонстрационных установках ближайшего периода, тогда как формирующиеся кластеры отражают направления, способные обеспечить прорывы к 2035 году.

Анализ значимости и карты динамики PEC-материалов

Карта «значимость-динамика» (рисунок 3) предоставляет двумерный обзор исследовательской активности в области PEC-материалов и демонстрирует контраст между зрелыми, но насыщенными темами (высокая значимость, низкая динамика) и новыми, но нишевыми направлениями (низкая значимость, высокая динамика).

Ось X (Dynamics) отражает нормализованный среднегодовой темп роста публикаций за последние пять лет, а ось Y (Significance) - накопленный вес научного вклада. Размер пузыря соответствует общему числу публи-

каций, цвет - семейству материалов.

TiO₂, Fe₂O₃ и BiVO₄ доминируют в верхнем левом квадранте: высокая значимость при умеренной или снижающейся динамике. TiO₂ остаётся наиболее изученным материалом благодаря стабильности и доступности, однако темпы роста публикаций стабилизировались. Эти направления относятся к категории «консолидированных технологий».

Переходные и гибридные направления (g-C₃N₄, WO₃, CdS, ZnO) занимают промежуточную зону значимости и демонстрируют умеренную динамику. Они формируют «зону диверсификации», где прогресс обусловлен интеграцией с другими полупроводниками.

CuO выделяется среди оксидных материалов как один из немногих примеров, демонстрирующих умеренную значимость при сохранении положительной динамики публикационной активности, что отличает его от большинства традиционных оксидных систем, характеризующихся стабилизацией или снижением темпов роста. Перовскиты галогенидов демонстрируют низкую PEC-специфичную активность, но активно развиваются в фотовольтаике, формируя потенциал для PEC-PV-тандемов. 2D-материалы (MoS₂, WS₂), нитриды и оксинитриды (GaN, Ta₃N₅, SiC) относятся к формирующимся направлениям с повышенной динамикой.

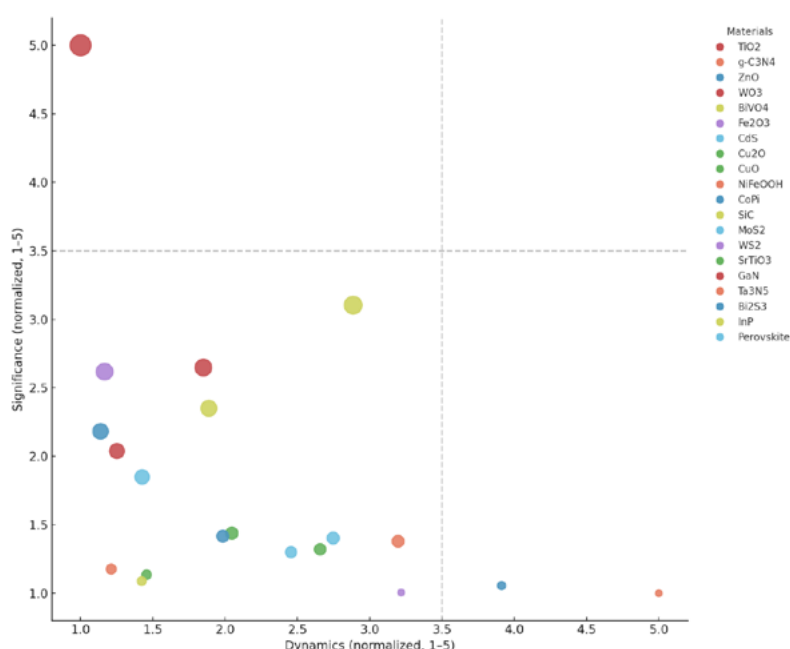


Рисунок 3. Двумерный обзор исследовательской активности в области материалов для PEC-водоразложения

Библиометрическое сравнение PEC-материалов: эффективность и динамика

Для оценки структуры и эволюции тематики PEC [28] была построена трёхмерная карта тематических кластеров (рисунок 4), где ось X – объём публикаций; ось Y – общее число цитирований; ось Z – размер кластера. Цвет представляет временное кодирование (фиолетовый относится к зрелым темам, зелёно-жёлтый к новым)

Ландшафт демонстрирует стратифицированную структуру: крупные «ядровые» кластеры с высоким числом публикаций и цитирований формируют фундамент направления. Меньшие, но высокоцитируемые кластеры отражают специализированные, но влиятельные исследования. Небольшие «нишевые» кластеры демонстрируют потенциал роста.

Перспективные направления включают BiVO₄-основанные фотоаноды (CAGR >20%, STH 2–4%), Cu₂O, WO₃, CuO.

Гибридные системы на основе углеродных материалов характеризуются невысокой медианной STH, но высокими темпами роста.

Зрелые материалы (TiO₂, α-Fe₂O₃) представляют крупные кластеры с ограниченным ростом.

Стратегически значимые материалы (Si, GaN, Ta₃N₅) сочетают высокую STH и устойчивый рост публикационной активности, что делает их ключевыми для развития PEC к 2035 году.

Использование данных на уровне аннотаций обеспечивает масштабируемость и воспроизводимость

анализа. Хотя полнотекстовый анализ дал бы более детальные параметры, он снижает сопоставимость и увеличивает вариативность извлечения данных. Следовательно, набор данных отражает не абсолютные рекордные показатели, а репрезентативные пороговые значения, акцентированные авторами публикаций.

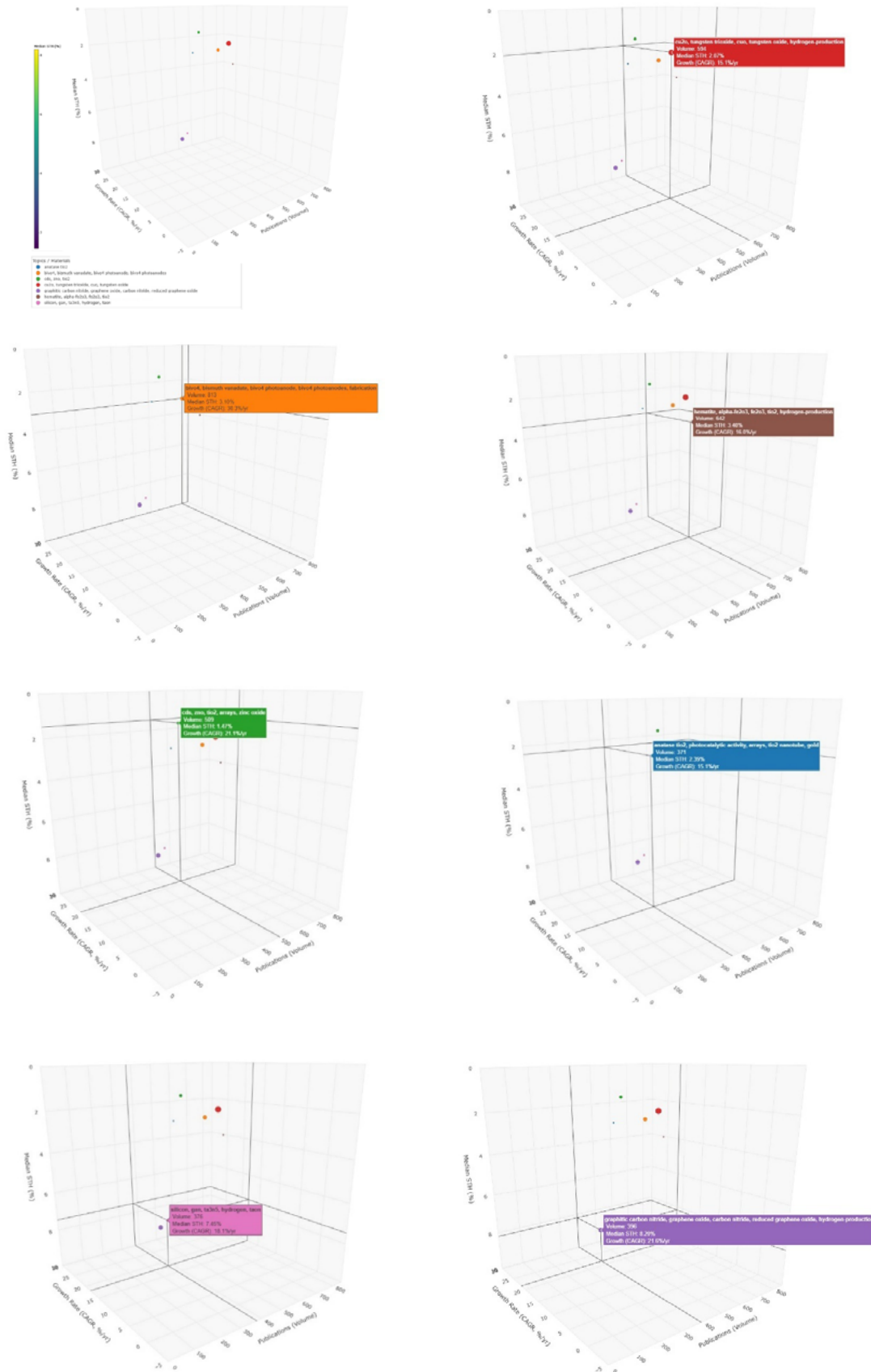


Рисунок 4. Трёхмерная библиометрическая карта, сопоставляющая объём публикаций

Заключение

Проведённый анализ показывает, что развитие водородной энергетики в условиях глобальной декарбонизации сталкивается не столько с отсутствием технологических решений, сколько с системными ограничениями масштабирования. Электролиз остаётся доминирующим низкоуглеродным маршрутом, однако его экономическая чувствительность к стоимости электроэнергии, несоответствие темпов наращивания мощностей целевым сценариям, а также инфраструктурные и инвестиционные барьеры формируют необходимость поиска комплементарных технологических платформ.

Фотоэлектрохимическое водоразложение демонстрирует концептуальное преимущество за счёт интеграции светопоглощения и электрохимической конверсии в единой системе, что потенциально снижает зависимость от сложных логистических цепочек и инфраструктуры централизованного производства. При этом достижение практически значимых значений solar-to-hydrogen эффективности требует преодоления пороговых уровней 3–5 % для энергетической целесообразности и порядка 10 % для коммерческой конкурентоспособности. Основными ограничениями остаются стабильность материалов, рекомбинационные потери и масштабируемость технологий.

Анализ механизма PEC подтверждает, что эффективность системы определяется балансом четырёх ключевых факторов – спектрального поглощения, разделения и транспорта носителей заряда, межфазной кинетики и долговременной устойчивости. Следовательно, дальнейший прогресс невозможен без комплексной оптимизации этих параметров на уровне материала и устройства.

Библиометрическое картирование и анализ динамики тематических кластеров выявили структурную стратификацию направления. Оксидные системы, такие как TiO₂, Fe₂O₃ и BiVO₄, формируют консолидированное ядро исследований, тогда как нитриды, перовскиты, 2D-материалы и гибридные архитектуры демонстрируют более высокую динамику роста и потенциал технологических прорывов. Особое значение приобретает переход от узко материаловедческой парадигмы к инженерии системного уровня, включая интеграцию PEC-модулей с системами хранения, разделения и теплового управления.

Замещение благородных металлов доступными катализаторами и развитие гибридных конструкций представляют важное направление снижения стоимостных барьеров. Вместе с тем форсайт-анализ указывает на недооценку системных рисков, связанных с сырьевой безопасностью и макроэкономической нестабильностью, что требует расширения аналитической рамки за пределы лабораторных показателей эффективности.

При этом социально-экономические факторы, включая общественное принятие технологий и волатильность стоимости материалов, будут играть всё более значимую роль при переходе от лабораторных разработок к промышленным решениям.

Таким образом, PEC-технологии следует рассматривать как долгосрочный элемент диверсифицированной водородной архитектуры. В краткосрочной перспективе зрелые оксидные системы могут служить платформой для демонстрационных установок, тогда как формирующиеся материалы и тандемные конфигурации обладают потенциалом обеспечения прорывных решений к 2035 году. Ключевым условием коммерциализации является переход от рекордных лабораторных показателей к воспроизводимым, масштабируемым и экономически обоснованным системам, интегрированным в распределённую энергетическую инфраструктуру.

Благодарности

Данное исследование было профинансировано Комитетом Науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № 061140007608/260009/00 от 2026-02-10 по специфике 001-103-154 «Услуги по проведению форсайтных исследований по развитию науки в рамках реализации Закона Республики Казахстан «О науке и технологической политике»). Авторы выражают благодарность Национальной академии наук Республики Казахстан при Президенте Республики Казахстан за оказанную поддержку.

Вклад авторов

Е.В. Шевченко - разработка концепции исследования, постановка задачи, участие в интерпретации результатов, редактирование рукописи.

Н.Б. Бакранов - участие в анализе фотоэлектрохимических данных, участие в интерпретации результатов, редактирование рукописи.

Б.Ж. Сейтов - участие в интерпретации данных, согласование окончательной версии статьи.

А.С. Серикканов - первичная обработка данных, участие в подготовке иллюстративного материала, написание текста статьи.

Д.И. Бакранова - критический анализ и редактирование содержания, координация работы авторского коллектива, редактирование рукописи, подача статьи в журнал.

С.А. Пазылбек - анализ данных, согласование окончательной версии статьи, проверка достоверности всех полученных результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательную версию статьи и несут ответственность за все её содержание.

Список литературы

1. International Renewable Energy Agency, Green Hydrogen: A Guide to Policy Making (IRENA, Abu Dhabi, 2020), доступно по адресу: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>.
2. D. Guan et al., Hydrogen society: from present to future, *Energy & Environmental Science* 16 (11), p.4926–4943 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3EE02695G>.
3. International Energy Agency; Japan for the G20, The Future of Hydrogen (IEA, Paris, 2019), доступно по адресу: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
4. International Energy Agency, Global Hydrogen Review 2024 (IEA, Paris, 2024), доступно по адресу: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>.
5. D. Hauglustaine et al., Climate benefit of a future hydrogen economy, *Communications Earth & Environment* 3 (1), p.1-14 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00626-z>.
6. Hydrogen Council; McKinsey & Company, Hydrogen Insights 2023 (2023), доступно по адресу: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2023/>.
7. Hydrogen Council; McKinsey & Company, Hydrogen Insights 2024 (2024), доступно по адресу: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2024/>.
8. S. Penttinen, Navigating the hydrogen landscape: An analysis of hydrogen support mechanisms in the US and the EU, *Review of European Comparative & International Environmental Law* 33 (3), p.397–411 (2024). <https://doi.org/10.1111/reel.12575>.
9. T. Chen et al., An overview of semiconductor electrode materials for photoelectrochemical water splitting and CO₂ conversion, *International Journal of Electrochemical Science* 19 (5), 100542 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100542>.
10. Z. Li et al., Surface engineering of hematite nanorods photoanode towards optimized photoelectrochemical water splitting, *Journal of Colloid and Interface Science* 626, p.879–888 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.07.018>.
11. S. Almaraz et al., A holistic approach to assessing reliability in green hydrogen supply chains using mixed methods, *Technological Forecasting and Social Change* 209, 123816 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123816>.
12. H. Zhang, H. Wang, J. Xuan, Rational design of photoelectrochemical cells towards bias-free water splitting: Thermodynamic and kinetic insights, *Journal of Power Sources* 462, 228113 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228113>.
13. U.S. Department of Energy, U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap (Washington, DC, 2023), доступно по адресу: https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/us-national-clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf?sfvrsn=c425b44f_5.
14. A. Ku et al., Opportunities for the materials research community to support the development of the H₂ economy, *MRS Energy & Sustainability* 10 (2), p.158–173 (2023). <https://doi.org/10.1557/s43581-023-00061-3>.
15. M. Bhatt, J. Lee, Nanomaterials for photocatalytic hydrogen production: from theoretical perspectives, *RSC Advances* 7 (55), p.34875–34885 (2017). <https://doi.org/10.1039/C7RA03435K>.
16. H. Oktar, I. Tonyali, A. Apaydin, A cost-effective and sustainable path to a green future: Retrofitting internal combustion engines for hydrogen fuel utilization, *International Journal of Hydrogen Energy* 143, p.969–977 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.240>.
17. F. Khodabandeh et al., Photoelectrochemical water splitting based on chalcopyrite semiconductors: A review, *International Journal of Hydrogen Energy* 65, p.779–803 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.378>.
18. S. Nasejje et al., Device architectures for photoelectrochemical water splitting based on hematite: a review, *Discover Materials* 4 (44) (2024). <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00112-7>.
19. D. Bakranova, B. Seitov, N. Bakranov, Preparation and photocatalytic/photoelectrochemical investigation of 2D ZnO/CdS nanocomposites, *ChemEngineering* 6 (87) (2022). <https://doi.org/10.3390/chemengineering6060087>.
20. Z. Dong et al., Recent advances and perspective of modified TiO₂-based photoanodes toward photoelectrochemical

- water splitting, Fuel 373, 122366 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132366>.
21. J. Ke et al., Nanocarbon-enhanced 2D photoelectrodes: A new paradigm in photoelectrochemical water splitting, Nano-Micro Letters 13 (24) (2021). <https://doi.org/10.1007/s40820-020-00545-8>.
 22. Brown T., Neumann F., Riepin I. Price formation without fuel costs: The interaction of demand elasticity with storage bidding, Energy Economics 147, 108483 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108483>.
 23. Kern F., Schmelzle F., Hummel M. Hydrogen as a panacea for decarbonising everything? Exploring contested hydrogen pathways in Germany, Environmental Research Letters 18, 114017 (2023). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acff0e>.
 24. L. Leypoldt et al., The hydrogen field in 2035: A Delphi study forecasting dominant technology bundles, Technological Forecasting and Social Change 207, 123593 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123593>.
 25. S. Sajjadian, A critique on the UK's net zero strategy, Sustainable Energy Technologies and Assessments 56, 103003 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.103003>.
 26. L. Bao (Jiming), High-efficiency solar water splitting by nanocrystalline cobalt (II) oxide photocatalyst and uses thereof, US patent, (2016).
 27. M. Demuth, A. Kuklya, Silicides for photoelectrochemical water splitting and/or the production of electricity, US patent, (2015).
 28. Y. Wei et al., Frontiers of low-carbon technologies: Results from bibliographic coupling with sliding window, Journal of Cleaner Production 190, 422–431 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.170>.

**Е.В. Шевченко¹, Н.Б. Бакранов^{1,2}, Б.Ж. Сейтов^{2,4},
А.С. Серикканов¹, Д.И. Бакранова^{2,3*}, С.А. Пазылбек⁵**

¹ *Национальная академия наук Республики Казахстан при Президенте Республики
Казахстан, Алматы, Казахстан*

² *«Research Group altAir nanolab», Алматы, Казахстан*

³ *SDU University, Каскелен, Казахстан*

⁴ *Международный казахско-турецкий университет имени Х.А. Ясави, Туркестан, Казахстан*

⁵ *Университет имени Ж.А. Ташенева, Шымкент, Казахстан*

*(E-mail: yelenashevchenko@gmail.com, bakranov@gmail.com, bekbolat.seitov@ayu.edu.kz,
a.serikkanov.nas@gmail.com, dinabakranova@gmail.com, sapargali.pa@gmail.com)*

Жасыл сутек алудың фотоэлектрохимиялық жолдары: талдау, шолу және форсайт

Аңдатпа. Декарбонизацияның қазіргі динамикасы қолданыстағы сутегі өндірісі модельдерінің құрылымдық шектеулерін көрсетеді. Техникалық және экономикалық бағалаулар энергия тұтынуы жасыл сутегінің негізгі шығын факторы болып қала беретінін, ал электролиз қуатын кеңейту қарқыны көміртегі бейтараптығы траекторияларына сәйкес келмейтінін көрсетеді. Орнатылған электролизер қуатының 2020 жылы шамамен 0,1 ГВт-тан 2023 жылы 1,75 ГВт-қа дейін өсуіне қарамастан, жарияланған жобалардың айтарлықтай бөлігі соңғы инвестициялық шешім қабылдау кезеңіне жетпейді және инфрақұрылымдық шектеулер сақталуда.

Бұл зерттеудің мақсаты - фотоэлектрохимиялық (ПЕС) сутегі өндірісі технологияларының эволюциясын жүйелі түрде талдау және олардың пайда болатын төмен көміртекті энергия архитектурасындағы әлеуетін бағалау. Фотоэлектрохимиялық суды бөлу жартылай өткізгіш жарықты сіңіру мен электрохимиялық суды бөлуді бір жүйеде біріктіретін балама технологиялық конфигурация ретінде қарастырылады, бұл жергілікті сутегі өндіруге мүмкіндік береді және орталықтандырылған электролиз схемаларымен салыстырғанда жеткізу тізбегінің осалдықтарын азайтады. Зерттеу әдістемесі материалтану деректерін синтездеу, библиометриялық көрсеткіштер және патент динамикасын қамтитын кешенді жүйелік талдауға негізделген. Күн энергиясын сутегіге түрлендіру тиімділігінің шекті мәндері, материалдық тұрақтылық шектеулері және оксид, нитрид, халькогенид және гибриді фотоэлектродтар үшін инновациялық даму траекториялары арасындағы байланыс талданады. Негізгі нәтиже - бағалы металдарды алмастыру, өнеркәсіптік үйлесімділікті жақсарту және оларды таратылған сутегі инфрақұрылымына біріктіруге бағытталған 2035 жылға дейінгі ПЕС технологияларын дамытудың болжамды жол

картасы. Зерттеудің ғылыми құндылығы PEC-тің сутегі энергиясын толықтыратын технология ретіндегі ұзақ мерзімді әлеуетін тұтас түсінуді дамытуда, ал оның практикалық маңыздылығы - жасыл сутегі өндірісі жүйелерін стратегиялық және технологиялық жоспарлауда зерттеу нәтижелерін пайдалану мүмкіндігінде.

Түйін сөздер: фотозлектрохимиялық су ыдырату; жасыл сутек; PEC-материалдар; жартылай өткізгіш фотоэлектродтар; solar-to-hydrogen тиімділігі; библиометриялық талдау; сутек инфрақұрылымы.

Ye.V. Shevchenko¹, N.B. Bakranov^{1,2}, B. Zh. Seitov^{2,4}, A.S. Serikkanov¹,
D.I. Bakranova^{2,3*}, S.A. Pazyzbek⁵

¹National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan under
the President of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

²«Research Group altAir nanolab», Almaty, Kazakhstan

³SDU University, Kaskelen, Kazakhstan

⁴Ahmet Yassawi University, Turkestan, Kazakhstan

⁵Tashenev University, Shymkent, Kazakhstan

(E-mail: yelenashevchenko@gmail.com, bakranov@gmail.com, bekbolat.seitov@ayu.edu.kz,
a.serikkanov.nas@gmail.com, dinabakranova@gmail.com, sapargali.pa@gmail.com)

Photoelectrochemical Pathways to Green Hydrogen: Analysis, Review, and Foresight

Abstract. The current dynamics of decarbonization reveal the structural limitations of existing hydrogen production models. Technical and economic assessments show that energy consumption remains the key cost factor for green hydrogen, while the pace of electrolysis capacity expansion is not aligned with carbon neutrality trajectories. Despite the growth of installed electrolyzer capacity from approximately 0.1 GW in 2020 to 1.75 GW in 2023, a significant portion of announced projects do not reach the final investment decision stage, and infrastructure constraints remain.

The objective of this study is to systematically analyze the evolution of photoelectrochemical (PEC) hydrogen production technologies and assess their potential in the emerging low-carbon energy architecture. Photoelectrochemical water splitting is considered as an alternative technology configuration that combines semiconductor light absorption and electrochemical water splitting in a single system, enabling localized hydrogen generation and reducing supply chain vulnerabilities compared to centralized electrolysis schemes. The research methodology is based on a comprehensive systems analysis, including the synthesis of materials science data, bibliometric indicators, and patent dynamics. The relationship between threshold values for solar-to-hydrogen conversion efficiency, material stability limitations, and innovative development trajectories for oxide, nitride, chalcogenide, and hybrid photoelectrodes is analyzed. The main result is a predictive roadmap for the development of PEC technologies through 2035, focused on substituting precious metals, improving industrial compatibility, and integrating them into a distributed hydrogen infrastructure. The scientific value of the study lies in the development of a holistic understanding of the long-term potential of PEC as a complementary technology to hydrogen energy, while its practical significance lies in the potential for using the findings in strategic and technological planning for green hydrogen production systems.

Keywords: Photoelectrochemical water splitting; green hydrogen; PEC materials; semiconductor photoelectrodes; solar-to-hydrogen efficiency; bibliometric analysis; hydrogen infrastructure.

References

1. International Renewable Energy Agency, Green Hydrogen: A Guide to Policy Making (IRENA, Abu Dhabi, 2020), доступно по адресу: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>.
2. D. Guan et al., Hydrogen society: from present to future, Energy & Environmental Science 16 (11), p.4926–4943 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3EE02695G>.
3. International Energy Agency; Japan for the G20, The Future of Hydrogen (IEA, Paris, 2019), доступно по адресу: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
4. International Energy Agency, Global Hydrogen Review 2024 (IEA, Paris, 2024), доступно по адресу: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>.
5. D. Hauglustaine et al., Climate benefit of a future hydrogen economy, Communications Earth & Environment 3 (1),

- p.1-14 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00626-z>.
6. Hydrogen Council; McKinsey & Company, Hydrogen Insights 2023 (2023), доступно по адресу: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2023/>.
 7. Hydrogen Council; McKinsey & Company, Hydrogen Insights 2024 (2024), доступно по адресу: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2024/>.
 8. S. Penttinen, Navigating the hydrogen landscape: An analysis of hydrogen support mechanisms in the US and the EU, Review of European Comparative & International Environmental Law 33 (3), p.397–411 (2024). <https://doi.org/10.1111/reel.12575>.
 9. T. Chen et al., An overview of semiconductor electrode materials for photoelectrochemical water splitting and CO₂ conversion, International Journal of Electrochemical Science 19 (5), 100542 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100542>.
 10. Z. Li et al., Surface engineering of hematite nanorods photoanode towards optimized photoelectrochemical water splitting, Journal of Colloid and Interface Science 626, p.879–888 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.07.018>.
 11. S. Almaraz et al., A holistic approach to assessing reliability in green hydrogen supply chains using mixed methods, Technological Forecasting and Social Change 209, 123816 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123816>.
 12. H. Zhang, H. Wang, J. Xuan, Rational design of photoelectrochemical cells towards bias-free water splitting: Thermodynamic and kinetic insights, Journal of Power Sources 462, 228113 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228113>.
 13. U.S. Department of Energy, U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap (Washington, DC, 2023), доступно по адресу: https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/us-national-clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf?sfvrsn=c425b44f_5.
 14. A. Ku et al., Opportunities for the materials research community to support the development of the H₂ economy, MRS Energy & Sustainability 10 (2), p.158–173 (2023). <https://doi.org/10.1557/s43581-023-00061-3>.
 15. M. Bhatt, J. Lee, Nanomaterials for photocatalytic hydrogen production: from theoretical perspectives, RSC Advances 7 (55), p.34875–34885 (2017). <https://doi.org/10.1039/C7RA03435K>.
 16. H. Oktar, I. Tonyali, A. Apaydin, A cost-effective and sustainable path to a green future: Retrofitting internal combustion engines for hydrogen fuel utilization, International Journal of Hydrogen Energy 143, p.969–977 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.240>.
 17. F. Khodabandeh et al., Photoelectrochemical water splitting based on chalcopyrite semiconductors: A review, International Journal of Hydrogen Energy 65, p.779–803 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.378>.
 18. S. Nasejje et al., Device architectures for photoelectrochemical water splitting based on hematite: a review, Discover Materials 4 (44) (2024). <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00112-7>.
 19. D. Bakranova, B. Seitov, N. Bakranov, Preparation and photocatalytic/photoelectrochemical investigation of 2D ZnO/CdS nanocomposites, ChemEngineering 6 (87) (2022). <https://doi.org/10.3390/chemengineering6060087>.
 20. Z. Dong et al., Recent advances and perspective of modified TiO₂-based photoanodes toward photoelectrochemical water splitting, Fuel 373, 122366 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.122366>.
 21. J. Ke et al., Nanocarbon-enhanced 2D photoelectrodes: A new paradigm in photoelectrochemical water splitting, Nano-Micro Letters 13 (24) (2021). <https://doi.org/10.1007/s40820-020-00545-8>.
 22. Brown T., Neumann F., Riepin I. Price formation without fuel costs: The interaction of demand elasticity with storage bidding, Energy Economics 147, 108483 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108483>.
 23. Kern F., Schmelzle F., Hummel M. Hydrogen as a panacea for decarbonising everything? Exploring contested hydrogen pathways in Germany, Environmental Research Letters 18, 114017 (2023). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acff0e>.
 24. L. Leypoldt et al., The hydrogen field in 2035: A Delphi study forecasting dominant technology bundles, Technological Forecasting and Social Change 207, 123593 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123593>.
 25. S. Sajjadian, A critique on the UK's net zero strategy, Sustainable Energy Technologies and Assessments 56, 103003

(2023). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.103003>.

26. L. Bao (Jiming), High-efficiency solar water splitting by nanocrystalline cobalt (II) oxide photocatalyst and uses thereof, US patent, (2016).
27. M. Demuth, A. Kuklya, Silicides for photoelectrochemical water splitting and/or the production of electricity, US patent, (2015).
28. Y. Wei et al., Frontiers of low-carbon technologies: Results from bibliographic coupling with sliding window, Journal of Cleaner Production 190, 422–431 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.170>.

Сведения об авторах:

Е.В. Шевченко – вице-президент Правления Национальной Академии наук Республики Казахстан при Президенте Республики Казахстан, 050010, Алматы, Казахстан.

Н.Б. Бакранов – PhD, главный научный сотрудник «Research Group altAir nanolab» 050043, Алматы, Казахстан

Б.Ж. Сейтов – PhD, заведующий кафедрой физики, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмета Яссави, 161200, Туркестан, Казахстан.

А.С. Серикканов – вице-президент Правления Национальной Академии наук Республики Казахстан при Президенте Республики Казахстан, 050010, Алматы, Казахстан.

Д.И. Бакранова – автор для корреспонденции, PhD, ассоциированный профессор SDU University, Факультет инженерии и естественных наук, ул. Абылай хана 1/1, 040900, Каскелен, Казахстан.

С.А. Пазылбек – доктор PhD, ассоциированный профессор кафедры «Математика и информатика», Университет имени Ж.А. Ташенева, проспект Кунаева 21, 160012, Шымкент, Казахстан.

Е.В. Шевченко – Қазақстан Республикасы Президентінің жанындағы Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы Басқармасының вице-президенті, 050010, Алматы, Қазақстан.

Н.Б. Бакранов – PhD, «research Group altAir nanolab» бас ғылыми қызметкері, 050043, Алматы, Қазақстан.

Б.Ж. Сейтов – PhD, Физика кафедрасының меңгерушісі, Қожа Ахмет Яссауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, 161200, Түркістан, Қазақстан.

А.С. Серикканов – Қазақстан Республикасы Президентінің жанындағы Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы Басқармасының вице-президенті, 050010, Алматы, Қазақстан.

Д.И. Бакранова – хат-хабар авторы, PhD, SDU University қауымдастырылған профессоры, инженерия және жаратылыстану ғылымдары факультеті, Абылай хан көшесі 1/1, 040900, Каскелең, Қазақстан.

С.А. Пазылбек – PhD, «Математика және информатика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Ж.А. Ташенев атындағы университет, Қонаев даңғылы 21, 160012, Шымкент, Қазақстан.

Ye.V. Shevchenko – Vice President of the Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan under the President of the Republic of Kazakhstan, 050010, Almaty, Kazakhstan.

N.B. Bakranov – PhD, Chief Researcher, Research Group altAir nanolab, 050043, Almaty, Kazakhstan.

B.Zh. Seitov – PhD, Head of the Department of Physics, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, 161200 Turkestan, Kazakhstan.

A.S. Serikkanov – Vice President of the Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan under the President of the Republic of Kazakhstan, 050010, Almaty, Kazakhstan.

D.I. Bakranova – the corresponding author, PhD, Associate Professor, SDU University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, 1/1 Abylai Khan str., 040900, Kaskelen, Kazakhstan.

S.A. Pazyzbek – PhD, Associate Professor of the Department of Mathematics and Computer Science, Zh.A. Tashenev University, 21 Kunaev Avenue, 160012, Shymkent, Kazakhstan.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).