УДК 72.012.6:621.311.243:681.5(575.2-25)
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-8-162-169

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МОДУЛЯМИ В АРХИТЕКТУРЕ ГОРОДА БИШКЕКА

А.Р. Гайсина, М.И. Бейшенбаев

Аннотация. Исследуется проектирование адаптивных кинетических фасадных систем с интегрированными фотоэлектрическими модулями для архитектуры города Бишкека. Основная проблема связана с тем, что солнечный потенциал городской застройки используется фрагментарно, а фасады общественных и учебных зданий чаще воспринимаются как статичная ограждающая поверхность, не участвующая в регулировании света, тепла и визуального комфорта. Цель работы – определить принципы включения подвижных фотоэлектрических элементов в фасадную оболочку с учетом инсоляции, сезонных температурных контрастов, пылевой нагрузки, ветровых воздействий и сейсмических требований Бишкекской городской среды. В результате предложена проектная модель кинетической солнечной оболочки, объединяющая затенение, выработку электроэнергии, архитектурную выразительность и сценарное управление. Новизна статьи состоит в локализации международных подходов к динамическим фотоэлектрическим фасадам для условий Бишкека и в разработке авторской матрицы проектных критериев, где энергетические, конструктивные, эстетические и эксплуатационные параметры рассматриваются как единая архитектурная задача.

Ключевые слова: архитектурная оболочка; солнечная энергетика; климатическая адаптация; динамическое затенение; энергоэффективность; фасадная система; городская среда; южная инсоляция; устойчивое проектирование.

БИШКЕК ШААРЫНЫН АРХИТЕКТУРАСЫНДА ИНТЕГРАЦИЯЛАНГАН ФОТОЭЛЕКТРДИК МОДУЛДАРЫ БАР АДАПТИВДҮҮ КИНЕТИКАЛЫК СИСТЕМАЛАРДЫ ДОЛБООРЛОО

А.Р. Гайсина, М.И. Бейшенбаев

Аннотация. Макалада Бишкек шаарынын архитектурасында имараттын кабыгына бириктирилген фотоэлектрдик модулдары бар адаптивдүү кинетикалык фасаддык системаларды долбоорлоо маселеси каралат. Изилдөөнүн негизги көйгөйү шаардык курулушта күн энергиясынын мүмкүнчүлүгү жетиштүү деңгээлде колдонулбай жаткандыгы жана көпчүлүк фасаддар жарыкты, жылуулукту, көлөкөнү жана көрүү ыңгайлуулугун активдүү жөнгө салган архитектуралык элемент катары каралбай тургандыгы менен байланыштуу. Иштин максаты – Бишкектин климаттык өзгөчөлүктөрүн, жайкы ысып кетүү коркунучун, кышкы суук мезгилди, чаңдуулукту, шамалдын таасирин жана сейсмикалык шарттарды эске алуу менен кыймылдуу күн модулдарын фасадга киргизүүнүн принциптерин аныктоо. Натыйжада көлөкөлөө, электр энергиясын өндүрүү, фасаддын көркөм образын түзүү жана автоматташтырылган башкаруу функцияларын бириктирген долбоордук модель сунушталды. Макаланын жаңылыгы эл аралык тажрыйбаны Бишкек шаарынын шарттарына ылайыкташтырууда жана энергетикалык, конструкциялык, эстетикалык, эксплуатациялык көрсөткүчтөрдү бирдиктүү долбоорлоо критерийи катары кароодо турат.

Түйүндүү сөздөр: архитектуралык кабык; күн энергетикасы; климаттык ылайыкташуу; динамикалык көлөкө; энергия үнөмдөө; фасад системасы; шаардык чөйрө; түштүк инсоляция; туруктуу долбоорлоо.

DESIGN OF ADAPTIVE KINETIC SYSTEMS WITH INTEGRATED PHOTOVOLTAIC MODULES IN THE ARCHITECTURE OF BISHKEK CITY

A.R. Gaisina, M.I. Beishenbaev

Abstract. The article examines the design of adaptive kinetic facade systems with integrated photovoltaic modules for the architecture of Bishkek. The research problem is that the solar potential of urban buildings is still used in a fragmented way, while facades of public and educational buildings are usually treated as static envelopes rather than active elements that can regulate daylight, heat gain, shading and visual comfort. The purpose of the study is to define design principles for movable photovoltaic elements in the building envelope, taking into account solar exposure, seasonal temperature contrasts, dust load, wind influence and seismic requirements of the Bishkek urban environment. The result is a design model of a kinetic solar envelope that combines shading, electricity generation, architectural expression and scenario-based control. The novelty of the article lies in adapting international approaches to dynamic photovoltaic facades to the local conditions of Bishkek and in proposing an author's matrix of design criteria, where energy, structural, aesthetic and maintenance parameters are considered as one integrated architectural task.

Keywords: architectural envelope; solar energy; climate adaptation; dynamic shading; energy efficiency; facade system; urban environment; southern insolation; sustainable design.

Введение. Современная архитектура все чаще рассматривает фасад не как нейтральную внешнюю плоскость, а как активную границу между городским климатом и внутренней средой здания. В этой логике строительно-интегрированные фотоэлектрические системы, обозначаемые в международной практике как BIPV, становятся не только источником локальной электроэнергии, но и элементом композиции, защиты от солнца, теплового регулирования и технологической идентичности здания [1]. Для Бишкека такой подход особенно важен: город расположен в зоне высокой солнечной активности, имеет выраженный летний перегрев на открытых южных и западных фасадах, но одновременно сталкивается с зимними температурными перепадами, пылевыми переносами и сейсмическими ограничениями.

Научная и практическая значимость темы определяется тем, что большая часть существующих фотоэлектрических установок воспринимается как инженерное оборудование, добавленное к зданию после формирования архитектурного решения. Такой подход упрощает монтаж, но часто снижает качество образа, ухудшает читаемость фасада и не использует потенциал оболочки как многофункциональной системы. Между тем обзорные исследования показывают, что BIPV уже рассматривается как зрелое направление, способное совмещать архитектурную и энергетическую функцию при условии грамотной деталировки, стандартизации и междисциплинарного проектирования [2].

Кинетический фасад добавляет к этому направлению еще один уровень – способность изменять геометрию в зависимости от солнца, ветра, времени суток, сценария использования помещения и требований пользователя. В архитектуре Бишкека такая оболочка может выполнять роль адаптивного фильтра: летом ограничивать перегрев и блёскость, зимой пропускать больше солнечного тепла, в переходные периоды повышать качество естественного освещения, а в городской перспективе создавать узнаваемый технологический силуэт общественных и университетских зданий.

Актуальность, постановка проблемы и научная новизна. Проблема проектирования адаптивных фотоэлектрических фасадов в Бишкеке находится на стыке трех задач.

Первая задача – энергетическая: город нуждается в более активном использовании распределенной солнечной генерации, особенно в общественных зданиях с большой площадью ограждающих конструкций.

Вторая задача – климатическая: статичные стеклянные фасады и непродуманные солнцезащитные решения усиливают перегрев, увеличивают зависимость от кондиционирования и ухудшают визуальный комфорт.

Третья задача – архитектурная: технологические элементы должны работать не как случайное навесное оборудование, а как осмысленная часть композиции, масштаба и материала фасада.

Актуальность темы усиливается международными исследованиями адаптивных фотоэлектрических экранов. В 2026 году была представлена многокритериальная оценка системы KineticSKIN, где подвижные тонкопленочные модули анализировались одновременно по защите от солнца, качеству дневного света, энергетической выработке, потребности в освещении, отоплении, охлаждении и энергии на привод [3]. В более ранних работах реального времени также показано, что адаптивные BIPV-экраны позволяют искать баланс между генерацией энергии и визуальным комфортом, а не решать эти задачи по отдельности [4]. Для Бишкекской среды такая логика особенно перспективна, поскольку ориентация фасада и сезонный угол солнца имеют прямое значение для теплового режима помещений.

Научная новизна данной статьи заключается не в простом переносе зарубежного технического образца в местный контекст, а в формировании проектной рамки для Бишкека. В статье предлагается рассматривать кинетическую фотоэлектрическую оболочку как систему с четырьмя равнозначными измерениями: энергетическим, климатическим, конструктивно-эксплуатационным и художественным. Именно соединение этих измерений позволяет избежать распространенной ошибки, когда фасад становится либо эффектной, но дорогой механической декорацией, либо полезной, но визуально чужеродной инженерной надстройкой.

Таблица 1 – Типы адаптивных фотоэлектрических фасадных систем

Тип системы	Архитектурная роль	Возможность применения в Бишкеке
Поворотные ламели	Регулируют тень, формируют ритм фасада, могут работать как второй слой оболочки	Наиболее перспективны для южных и западных фасадов учебных, офисных и общественных зданий
Складные панели	Создают пластичную поверхность с переменной глубиной и выраженной динамикой	Требуют защиты шарниров от пыли, снега и резких температурных колебаний
Подвижные фотоэлектрические экраны	Работают как внешняя солнцезащита и как энергетический слой перед остеклением	Целесообразны в атриумах, переходах, библиотечных и лабораторных корпусах
Сезонно регулируемые панели	Меняют угол не постоянно, а по заранее заданным сезонным положениям	Хороший компромисс для локального строительства, где важны простота и ремонтопригодность

Материалы и методы исследования. Методическая основа исследования включает сравнительный анализ научных публикаций о кинетических фотоэлектрических фасадах, изучение международных рекомендаций по BIPV, климатическую интерпретацию условий Бишкека и проектное моделирование сценариев движения фасадных элементов (таблица 1). В качестве исходных материалов рассмотрены работы, где кинетические модули оцениваются по дневному освещению и энергии [5], параметрическому изменению угла солнечных панелей [6], а также систематические обзоры кинетических солнцезащитных систем, показывающие разнообразие механизмов движения и биомиметических принципов [7].

Для адаптации к Бишкеку применен не расчет отдельного здания, а типологический подход. Он позволяет выявить повторяющиеся условия, с которыми сталкивается архитектор: ориентация фасада, глубина помещения, режим использования, видимость системы с улицы, доступ к обслуживанию, возможность очистки и устойчивость к аварийным положениям. Такой метод соответствует ранней

стадии архитектурного проектирования, когда еще важно выбрать принцип оболочки, а не только рассчитать окончательную мощность оборудования.

Проектная оценка велась по пяти группам критериев: инсоляция и выработка электроэнергии; регулирование света и защиты от перегрева; конструктивная безопасность и масса подвижных элементов; эксплуатация, очистка и ремонт; визуальная интеграция в городскую среду (таблица 2). Особое внимание уделено стандартам и регуляторным пробелам, поскольку международные материалы IEA PVPS подчеркивают необходимость рассматривать BIPV одновременно как электротехническое изделие и как строительный компонент с требованиями к долговечности, механической и пожарной безопасности [8].

Таблица 2 – Матрица проектной оценки кинетической солнечной оболочки

Критерий	Что проверяется	Проектное решение
Инсоляция	Положение солнца, ориентация фасада, риск самозатенения, возможность сезонной настройки	Параметрическая сетка ламелей с ограничением углов, которые ухудшают дневной свет
Комфорт	Блескость, глубина проникновения света, перегрев возле остекления, сохранение вида наружу	Разделение верхней и нижней зоны фасада на разные сценарии раскрытия
Конструкция	Вес модулей, жесткость креплений, безопасное положение при ветре, сейсмическая совместимость	Легкие секции, независимые приводы, аварийная фиксация и доступ к узлам
Эксплуатация	Пыль, снег, очистка стекла, замена модулей, доступность кабельных трасс	Модульный шаг, съемные кассеты, наружные сервисные проходы или обслуживаемый второй фасад
Образ	Соответствие масштабу улицы, цветовая стратегия, восприятие движения фасада	Сдержанная кинетика, привязанная к ритму окон, солнцу и функциональной структуре здания

Кинетическая солнечная оболочка как архитектурно-инженерная система. Адаптивная кинетическая система с фотоэлектрическими модулями состоит из несущей подсистемы, подвижного элемента, фотоэлектрического слоя, кабельных и инверторных компонентов, датчиков, приводов и алгоритма управления. Для архитектора принципиально важно, что каждый из этих элементов имеет визуальное выражение. Профиль направляющей, толщина ламели, цвет модуля, шаг крепления и скорость движения воспринимаются пользователем как часть образа здания, поэтому инженерная оптимизация не может быть отделена от композиционного решения.

В отличие от статичного BIPV-фасада, кинетическая оболочка работает во времени. Утром она может открывать нижнюю часть окна для обзора и направлять верхние ламели на солнце; в полдень переходить в режим защиты от перегрева; вечером – снижать угол, чтобы сохранить естественный свет без избыточной блёскости. Такой сценарный принцип близок к исследованиям адаптивных фотоэлектрических солнцезащитных устройств, где баланс между светом, теплом, энергией и пользовательским предпочтением становится главным предметом оценки [3, 4].

Для Бишкека особенно важна умеренная кинетика. Сложная постоянно движущаяся система может оказаться слишком дорогой и уязвимой к загрязнению. Поэтому рациональной моделью является комбинация двух режимов: автоматического ежедневного поворота в ограниченном диапазоне и сезонной перенастройки углов. В такой схеме фасад не превращается в механический аттракцион, но получает возможность реагировать на реальный климатический цикл и сохраняет обслуживаемость.

Климатические условия Бишкека и проектные сценарии. Солнечная стратегия для Бишкека должна исходить из горно-долинного положения города, высокой доли ясных периодов, значительных сезонных колебаний температуры и характерной пылевой нагрузки городской среды. Данные Global Solar Atlas описывают фотоэлектрический потенциал через показатель ожидаемой выработки на единицу установленной мощности и дают возможность сопоставлять территории в географической сетке [9]. Методология NASA POWER, в свою очередь, показывает, что оценки солнечной радиации формируются на основе спутниковых наблюдений и радиационных моделей, что полезно для предварительного архитектурно-климатического анализа [10].

Практическое значение этих данных для архитектора состоит не в механическом выборе максимальной мощности, а в понимании сезонного поведения фасада. Южные фасады в Бишкеке имеют высокий потенциал для регулируемых ламелей, так как летом требуют активного затенения, а зимой могут работать на пропуск низкого солнца. Западные фасады сложнее: послеобеденное солнце дает сильный перегрев, поэтому здесь нужны более глубокие экраны, ограничение бликов и возможность быстрого перехода в защитное положение. Восточные фасады обычно менее конфликтны, но могут использоваться для мягкой утренней генерации.

Дополнительным фактором является городская пыль. Для фотоэлектрического фасада загрязнение не только снижает энергетическую эффективность, но и ухудшает внешний вид, особенно если модули находятся в первом визуальном плане. Поэтому кинетическая система должна проектироваться с доступом к очистке, уклонами, не задерживающими воду и снег, а также с безопасным положением при сильном ветре. Сейсмичность региона требует, чтобы подвижные элементы не становились опасными вторичными массами при динамических воздействиях (таблица 3).

Таблица 3 – Климатические факторы Бишкека и архитектурные ответы

Фактор	Проектный риск	Рекомендуемый ответ
Летняя инсоляция	Перегрев помещений, блескость, рост нагрузки на охлаждение	Глубокие поворотные ламели, раздельное управление верхней и нижней зоной окна
Низкое зимнее солнце	Недостаточное использование пассивного тепла при чрезмерно закрытой оболочке	Сезонные углы раскрытия, режим зимнего пропуска света и тепла
Пыль и загрязнение	Снижение выработки и ухудшение визуального качества фасада	Доступная очистка, гладкие поверхности, минимизация горизонтальных пылесборных полок
Ветер и снег	Повреждение подвижных элементов, застревание механизмов	Аварийное положение, датчики ветра, защищенные шарниры и ограничители хода
Сейсмичность	Риск отрыва панелей, повреждение креплений и кабельных трасс	Легкие кассеты, независимое крепление, проверка узлов на динамические воздействия

Предложения по проектированию адаптивных фотоэлектрических систем.

Первое предложение заключается в создании типового проектного модуля для общественных и университетских зданий Бишкека. Такой модуль может иметь ширину, согласованную с шагом окон, и состоять из двух зон: верхней энергетической ламели и нижней светорегулирующей ламели. Верхняя зона ориентируется на максимальное получение солнечной энергии, нижняя – на сохранение обзора, снижение блёскости и комфорт пользователя. Разделение функций уменьшает конфликт между генерацией и качеством пространства.

Второе предложение связано с выбором материала. Для непрозрачных простенков рациональны темные или цветные фотоэлектрические панели, которые могут заменить часть облицовки. Для атриумов, переходов и больших остекленных участков перспективны полупрозрачные модули: они дают не максимальную выработку, но позволяют сохранить световой характер интерьера. Цветовые решения следует подбирать не по принципу маскировки технологии, а по принципу архитектурной согласованности с камнем, металлом, стеклом и теневым рисунком фасада.

Третье предложение – использовать ограниченное, понятное пользователю движение. Фасад должен иметь не десятки случайных положений, а несколько читаемых сценариев: утренний, дневной, летний защитный, зимний открытый, ветровой аварийный и сервисный. Такой подход облегчает эксплуатацию, позволяет вручную переопределять автоматику в аудиториях и кабинетах, а также уменьшает риск визуального хаоса на улице.

Четвертое предложение касается цифрового сопровождения. На стадии эскиза необходимо проверять не только площадь установленных модулей, но и траекторию тени, вероятность бликов, доступ к обслуживанию, распределение кабельных трасс и возможность замены отдельной панели без разборки крупного участка фасада. Для крупных объектов целесообразно создавать цифровой паспорт кинетической оболочки с описанием модулей, приводов, контроллеров, гарантийных сроков и режимов безопасного положения (таблица 4).

Таблица 4 – Проектные этапы внедрения кинетической фотоэлектрической оболочки

Этап	Содержание работ	Результат
Предпроектный анализ	Оценка ориентации здания, теней от соседней застройки, режима помещений и видимости фасада	Выбор фасадов, где подвижная система действительно оправдана
Эскизная схема	Формирование ритма модулей, диапазона углов, цветовой стратегии и сценариев движения	Архитектурная модель оболочки без перегруженной механизации
Инженерная проверка	Расчет креплений, ветрового и сейсмического воздействия, кабельных трасс и пожарных разрывов	Безопасная и согласуемая конструктивная схема
Энергетическое моделирование	Оценка выработки, самозатенения, дневного света, перегрева и работы приводов	Баланс между генерацией, комфортом и эксплуатационными затратами
Пилотная эксплуатация	Мониторинг загрязнения, отказов, пользовательских настроек и фактической работы сценариев	Корректировка алгоритма управления и регламент обслуживания

Анализ возможных архитектурных решений для городской среды. В Бишкеке наиболее перспективными площадками для внедрения адаптивных фотоэлектрических систем являются здания образования, административные корпуса, культурные центры, медицинские объекты и транспортные павильоны. Эти типологии имеют разные режимы эксплуатации, но все они работают с публичным образом города. Университетский корпус, например, может использовать кинетическую оболочку как демонстрационную лабораторию устойчивого проектирования, где технология видна студентам, преподавателям и горожанам, но при этом подчинена строгой функциональной логике.

Для исторически сложившихся улиц с небольшим масштабом застройки подвижные системы должны быть особенно деликатными. Здесь предпочтительны небольшие модули, матовые поверхности, спокойная цветовая гамма и отсутствие резких бликов. Для новых районов и университетских кампусов допустима более выразительная кинетика: крупный шаг ламелей, изменение глубины тени в течение дня и визуальное считывание солнечной траектории на фасаде.

Эстетический потенциал таких систем состоит в том, что фасад становится не замороженной картинкой, а медленно меняющейся городской поверхностью. Однако движение должно быть содержательным. Если ламели поворачиваются только ради эффекта, фасад быстро теряет архитектурную убедительность. Если же движение связано с освещением аудиторий, защитой от перегрева и фактической генерацией энергии, оно становится частью архитектурного языка (таблица 5).

Таблица 5 – Ожидаемый эффект от внедрения адаптивных фотоэлектрических фасадов

Направление эффекта	Содержание	Показатель для мониторинга
Энергетический	Локальная выработка электроэнергии и снижение части нагрузки на общедомовые системы	Фактическая выработка по месяцам, доля покрытия собственных нужд
Климатический	Сокращение перегрева и более гибкое управление дневным светом	Температура у фасада, жалобы на блескость, часы комфортного освещения
Архитектурный	Формирование выразительной, но функционально мотивированной фасадной пластики	Визуальная целостность, соответствие масштабу улицы, восприятие пользователями
Эксплуатационный	Переход от разрозненного оборудования к обслуживаемой модульной системе	Частота отказов, скорость замены модуля, стоимость очистки и сервиса
Образовательный	Использование фасада как демонстрационного объекта для архитектурных и инженерных программ	Учебные измерения, исследовательские проекты, доступность данных мониторинга

Ограничения и условия безопасного применения. Несмотря на высокий потенциал, адаптивные кинетические системы не должны назначаться автоматически для каждого здания. Их применение оправдано там, где фасад получает достаточно солнечной радиации, имеет значимую площадь, влияет на комфорт помещений и может обслуживаться без чрезмерных затрат. На северных фасадах, в плотной тени соседних зданий или на объектах с малым бюджетом рациональнее применять статичные BIPV-панели, традиционную солнцезащиту или комбинированные решения без сложного привода.

Главные риски для Бишкекской практики связаны с недооценкой обслуживания. Пыль, снег, температурные перепады и возможные перебои питания требуют, чтобы фасад имел безопасное положение по умолчанию. Если автоматика отключена, модули должны сохранять устойчивость, не перекрывать эвакуационные пути, не создавать опасных бликов для транспорта и не блокировать естественное проветривание. Кинетический элемент должен проектироваться как строительный компонент с расчетным сроком службы, а не как временный интерактивный объект.

Еще одно ограничение связано с нормативной средой. Международные материалы по стандартизации BIPV показывают, что интегрированные фотоэлектрические изделия часто попадают между нормами электротехники и нормами ограждающих конструкций [8]. Для Кыргызстана это означает необходимость раннего согласования с проектировщиками электроснабжения, пожарной безопасности, фасадных систем и несущих конструкций. Чем позже эта координация начинается, тем выше риск того, что архитектурная идея будет упрощена до обычного навесного оборудования.

Заключение. Проектирование адаптивных кинетических систем с интегрированными фотоэлектрическими модулями для архитектуры Бишкека следует рассматривать как комплексную задачу, объединяющую энергоэффективность, солнцезащиту, визуальный комфорт, конструктивную безопасность и городской образ. Наиболее рациональным направлением является не максимальная механизация фасада, а умеренная, обслуживаемая и сценарно управляемая кинетика, связанная с ориентацией здания, режимом помещений и сезонной траекторией солнца.

Ожидаемый эффект от внедрения таких систем выражается в повышении энергетической автономности общественных зданий, снижении перегрева в летний период, улучшении качества естественного освещения и формировании новой архитектурной выразительности, соответствующей задачам устойчивого развития города. Для практической реализации необходимы пилотные проекты, мониторинг фактической выработки, разработка регламентов очистки и обслуживания, а также междисциплинарная координация архитекторов, инженеров, энергетиков и специалистов по безопасности.

Главный вывод состоит в том, что кинетический фотоэлектрический фасад для Бишкека должен быть локальным по логике, а не только импортированным по технологии. Его ценность определяется не количеством установленных модулей, а тем, насколько точно система отвечает климату, структуре здания, городской улице и потребностям пользователей.

Поступила: 04.06.2026; рецензирована: 18.06.2026; принята: 19.06.2026.

Литература

1. IEA PVPS Task 15. Enabling Framework for the Development of BIPV. URL: https://iea-pvps.org/research-tasks/enabling-framework-for-the-development-of-bipv/ (дата обращения: 06.05.2026).
2. *Faes A., Virtuani A., Quest H., Maturi L., Scognamiglio A., Frontini F. et al*. Building-integrated photovoltaics // Nature Reviews Clean Technology. 2025. Vol. 1. P. 333–350. DOI: 10.1038/s44359-025-00059-9. URL: https://www.nature.com/articles/s44359-025-00059-9 (дата обращения: 06.05.2026).
3. *Ghidini A.C., Österreicher D., Matheou M.* Multi-criteria performance assessment of an adaptive kinetic photovoltaic shading system // Frontiers in Built Environment. 2026. Vol. 12. DOI: 10.3389/fbuil.2026.1788657. URL: https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2026.1788657/full (дата обращения: 06.05.2026).
4. *Biloria N., Makki M., Abdollahzadeh N.* Multi-performative façade systems: The case of real-time adaptive BIPV shading systems to enhance energy generation potential and visual comfort // Frontiers in Built Environment. 2023. Vol. 9. DOI:10.3389/fbuil.2023.1119696. URL: https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2023.1119696/full (дата обращения: 06.05.2026).
5. *Sureshkumar Jayakumari S.D., Imalka S.T., Yang R.J., Liu C., Yang S., Marschall M. et al*. Energy and Daylighting Performance of Kinetic Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) Façade // Sustainability. 2024. Vol. 16, No. 22. Article 9739. DOI: 10.3390/su16229739. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/16/22/9739 (дата обращения: 06.05.2026).
6. *Choi H.S.* Kinetic Photovoltaic Facade System Based on a Parametric Design for Application in Signal Box Buildings in Switzerland // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, No. 7. Article 4633. DOI: 10.3390/app13074633. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/13/7/4633 (дата обращения: 06.05.2026).
7. *Brzezicki M.* A Systematic Review of the Most Recent Concepts in Kinetic Shading Systems with a Focus on Biomimetics: A Motion/Deformation Analysis // Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 13. Article 5697. DOI: 10.3390/su16135697. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/16/13/5697 (дата обращения: 06.05.2026).
8. *Parolini F., Bonomo P.* (eds.). Advancing BIPV Standardization: Addressing Regulatory Gaps and Performance Challenges. IEA PVPS Task 15, Report T15-24:2024. Executive Summary. URL: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/12/IEA-PVPS-T15-24-2024-EXEC-SUMM-BIPV-Standardization.pdf (дата обращения: 06.05.2026).
9. World Bank Group, ESMAP, Solargis. World-Photovoltaic Power Potential (PVOUT) GIS Data, Global Solar Atlas. URL: https://energydata.info/dataset/world-photovoltaic-power-potential-pvout-gis-data-global-solar-atlas (дата обращения: 06.05.2026).
10. NASA POWER. Energy Fluxes Data Overview. URL: https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/energy-fluxes/ (дата обращения: 06.05.2026).