

Оценка технического и экономического потенциала солнечных панелей на крышах домов в Надоре, Марокко, с использованием передовых методов ГИС и данных дистанционного зондирования

Рашид Ламбарки^{a,*}, Эльмостафа Ач баб^b, Мехди Маанан^a, Хасан Ринане^a

^a Лаборатория геологических наук, факультет естественных наук Айн-Шок, Университет Хасана II, Касабланка, Марокко.

^b Лаборатория возобновляемой энергии и системной динамики, факультет естественных наук Айн-Шок, Университет Хасана II, Касабланка, Марокко.

Аннотация

Применение неиспользуемых крыш является перспективным решением для удовлетворения растущих энергетических потребностей городов. В данном исследовании определены стратегические места для установки фотоэлектрических (PV) систем и оценена выработка энергии в Надоре, Марокко, путем сравнения различных PV-модулей на основе солнечного света, а также с учетом экономического анализа. Ключевым нововведением данного исследования является новое применение облаков точек LiDAR (Light Detection and Ranging) в сочетании с фотограмметрической реконструкцией, что позволяет построить 3D-модель зданий. Для определения эффективной площади каждой крыши был проведен булев многокритериальный анализ с учетом таких параметров, как уклон, ориентация, затенение и доступность, при этом были исключены неподходящие здания. Была определена значительная площадь в 336 га, пригодная для солнечных систем, что составляет 61% от общей площади существующих сооружений, со средней годовой солнечной радиацией 1413,71 кВт·ч/м². Фотоэлектрический модуль CIS (медь/индий/селен) выделяется как привлекательный вариант, предлагающий энергетическую мощность 168,56 МВт и значительный объем произведённой энергии в 311,35 ГВт·ч. Умеренная первоначальная стоимость в 376,95 млн долларов США делает их финансово привлекательными, обеспечивая окупаемость инвестиций в течение 10 лет. С экологической точки зрения, модуль CIS вносит существенный вклад в сокращение выбросов CO₂, тем самым смягчая воздействие на окружающую среду. Ожидается, что внедрение модуля CIS позволит значительно увеличить производство солнечной энергии, превышающее прогнозируемый спрос городского населения. Данные были интегрированы в географическую информационную систему для определения крыш, подходящих для установки солнечных панелей, что легло в основу точного солнечного кадастра. Это исследование активно способствует формированию устойчивого энергетического ландшафта путем продвижения экологически чистых решений, тем самым играя роль в переходе к более устойчивому энергетическому будущему в Надоре.

Ключевые слова: Фотоэлектрический модуль; Солнечное излучение; LiDAR; 3D-модель; ГИС; Булев многокритериальный анализ

0 Введение

В современном контексте человечество сталкивается с серьезными задачами, связанными с нехваткой энергетических ресурсов, глобальным потеплением и острой необходимостью компенсации выбросов парниковых газов [1]. Эти сложности привели к стремительному развитию альтернативных источников энергии не только как инструмента борьбы с загрязнением окружающей среды, но и для снижения зависимости от импортируемого ископаемого топлива, такого как нефть и газ. Среди перспективных возобновляемых источников энергии выделяется солнечная энергия благодаря своей экологической чистоте, оптимальной эффективности и потенциалу внести значительный вклад в удовлетворение глобальных энергетических потребностей [2].

Марокко, обладающее климатическим преимуществом в 3000 солнечных часов в год и средней интенсивностью излучения, превышающей $5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, стало регионом со значительным солнечным потенциалом [3]. Марокканский план развития солнечной энергетики демонстрирует приверженность страны солнечной энергии, ставя перед собой амбициозную цель – к 2030 году производить 52% электроэнергии из возобновляемых источников [4]. Город Надор, расположенный на северо-востоке страны, играет ключевую роль в реализации этих мероприятий. Солнечный комплекс «Нур» является свидетельством приверженности Марокко фотоэлектрической (PV) энергетике. Запущенные в 2016 году установки «Нур Лаайун», «Нур Буждур» и «Нур Уарзат I и II» значительно увеличили потенциал страны по производству солнечной электроэнергии [5]. Эти объекты не только сократили выбросы парниковых газов, но и стимулировали региональное экономическое развитие.

Многочисленные исследования изучали солнечный потенциал городских крыш с помощью инструментов географических информационных систем (ГИС), выявив значительные возможности для производства возобновляемой энергии в городских условиях. Хотя эти исследования предлагают прочную основу, они также имеют определенные недостатки, которые наша работа стремится преодолеть. Существующие методы используют 3D-модели и локальные метеорологические данные [6] или геопространственные данные и цифровые модели поверхности для оценки солнечного потенциала [7,8]. Однако эти подходы часто сталкиваются со сложностями точности в непростых городских условиях, особенно из-за эффектов затенения и изменчивости характеристик крыш. Эффект затенения возникает из-за находящихся поблизости объектов, таких как здания или деревья, которые блокируют солнечный свет, достигающий крыш, тем самым снижая эффективность фотоэлектрических панелей. Эти тени меняются в зависимости от времени суток и сезона. Изменчивость характеристик крыши (ориентация, уклон, форма) также влияет на воздействие солнечного света. Например, крыши, обращенные на юг, получают больше солнечного света, чем затененные или имеющие небольшой уклон.

Исследование показало, что городское затенение в Гонконге снижает годовой потенциал солнечной энергии на 35,7% [9], что подчеркивает важность учета этой переменной во избежание переоценки потенциала солнечной энергии. Наше исследование предлагает более всесторонний многокритериальный анализ, который включает не только ориентацию и уклон крыши, но и дополнительные критерии, такие как безопасность и доступность для установки панелей. В отличие от исследования, которое фокусируется исключительно на оценке отдельных участков в Тегеране [10], наша работа применяет эти методы в масштабе города, тем самым определяя оптимальные зоны для установки солнечных панелей по всему городу Надор.

Кроме того, наше исследование предлагает более детальный экономический подход, включающий анализ затрат и выгод, специфичный для различных типов фотоэлектрических модулей (таких как модули из меди/индия/селена (CIS), которые обеспечивают благоприятный баланс между прибыльностью и долговечностью). Хотя исследования [7,8] предлагают общий экономический анализ, они не рассматривают конкретные экономические последствия каждой фотоэлектрической технологии, а также не учитывают затраты на техническое обслуживание или долгосрочные эффекты долговечности. Включение этих параметров повышает точность нашей экономической оценки.

В заключение, мы предлагаем новый интегрированный метод оценки солнечной мощности городских крыш, оптимизирующий использование ГИС и данных лазерного сканирования (LiDAR) для повышения точности 3D-моделирования зданий, а также включающий анализ доступности и безопасности установок. В целом, данное исследование восполняет пробелы в предыдущих работах, предлагая более всеобъемлющую методологию, адаптированную к специфическим требованиям крупномасштабной оценки, одновременно решая технические и экономические задачи, связанные со сложной городской средой и растущим спросом на возобновляемую энергию.

В данном исследовании используется ГИС для оценки целесообразности внедрения систем солнечной энергии в городе Надор, Марокко. Исследование сосредоточено на нескольких задачах: во-первых, проанализировать доступные площади крыш, подходящие для установки фотоэлектрических солнечных батарей, с учетом таких факторов, как ориентация, наклон, затенение и доступность; во-вторых, оценить уровни солнечной радиации для определения потенциальной эффективности и выработки энергии этими системами; в-третьих, оценить установленную мощность и спрогнозировать производство электроэнергии на основе площади крыши, солнечной радиации и эффективности панелей. Кроме того, в исследовании рассматриваются экономические выгоды, затраты и сокращение выбросов CO₂ с целью количественной оценки социально-экономических последствий и преимуществ для жителей и окружающей среды. ГИС облегчает анализ пространственных данных, обеспечивая надежную основу для устойчивого планирования в области энергетики в городе Надор.

1 Методология

Оценка потенциала фотоэлектрической энергии на крышах становится еще более важной в связи с дефицитом незастроенных территорий, усугубляемым быстрой урбанизацией Надора. Данный анализ распространяется на городской масштаб, учитывая экономические выгоды от использования этой технологии и всесторонне оценивая общие затраты, связанные с ее установкой. Он направлен на то, чтобы сбалансировать растущий спрос на энергию с недостатками относительно площади, предоставляя углубленный анализ целесообразности и последствий интеграции солнечной энергии в городской контекст Надора.

Надор был выбран для этого исследования по нескольким причинам. Во-первых, как уже упоминалось, город получает 3000 часов солнечного света в год, а средняя интенсивность излучения превышает 5 кВт·ч/м². Кроме того, город переживает бурный рост урбанизации, что приводит к значительному спросу на энергию. Более того, близость Надора к лагуне Марчика, являющейся экологическим наследием, требует тщательной защиты от городского загрязнения. Это исследование идеально соответствует директивам Королевства Марокко, которые поощряют внедрение возобновляемых источников энергии для решения проблемы нехватки энергии при сохранении природы.

В данном исследовании был применен многокритериальный булевый анализ с использованием ГИС, позволяющий тщательно оценить оптимальные места для установки солнечных панелей, исключив менее благоприятные для производства фотоэлектрической энергии участки. Он учитывает различные параметры, такие как наличие теней, ориентация поверхности, оптимальный наклон, легкость доступа и исключение неподходящих сооружений. Сочетание этих критериев обеспечивает повышенную точность определения наиболее благоприятных мест для эффективного использования солнечной энергии, тем самым способствуя более стратегическому и устойчивому планированию в области энергетики.

Этот сложный процесс реализуется с использованием инструмента ArcGIS и основан на детальной 3D-модели, построенной на основе облака точек данных LiDAR. Данные LiDAR предоставили подробную 3D-информацию о высоте зданий и наклоне крыш, которая затем была обработана и проанализирована в рамках ГИС-системы. Данные LiDAR, использованные в этом исследовании, были предоставлены Управлением городского развития Надора.

Сначала были определены границы города, и данные о пространственном распределении городских сооружений были собраны с помощью фотограмметрической реконструкции Nador — метода, использующего аэрофотоснимки для создания 3D-моделей городской топографии. Такой подход позволил получить детальное представление о городских особенностях, что необходимо для всесторонней оценки пригодности крыш для установки солнечных фотоэлектрических систем. Затем облако исходных данных LiDAR было обработано и отфильтровано. Были сохранены только

начальные эхо-сигналы от первых отражений, включая такие элементы, как растительность, распределение зданий и топографические детали. Цель этого шага — уточнить набор данных для углубленного анализа.

Уточненные данные LiDAR затем были использованы для создания подробной 3D-модели города, которая послужила фундаментальной основой для исследования, обеспечив эффективную характеристику положения и конфигурации сооружений. Для определения подходящей площади крыши для установки солнечных панелей был проведен булевый многокритериальный анализ, где каждый критерий оценивался значением 1 для соответствия и 0 для несоответствия, создавая бинарную последовательность. Путем объединения этих бинарных слоев была получена всесторонняя карта мест, отвечающих всем критериям, включая уклон крыши, ориентацию, влияние тени, доступ к солнечным модулям и наличие структурных препятствий.

Для оценки доступной солнечной энергии в кВт·ч/м² и, как следствие, годовой выработки электроэнергии за счет этого излучения, были применены расчетные уравнения, основанные на широте, наклоне и ориентации крыш. Были проанализированы различные типы солнечных панелей, представленные на рынке, каждый из которых характеризуется определенным уровнем эффективности.

Различия в производительности разнообразных технологий солнечных панелей, будь то на основе кремния, тонкопленочных технологий или других материалов, приводят к расхождениям в производстве энергии. Уровень эффективности солнечной панели определяет ее способность преобразовывать солнечную энергию в электричество, что, в свою очередь, напрямую влияет на общую производительность фотоэлектрической системы.

Результаты, касающиеся зданий, расположенных в интересующей нас зоне, были сгруппированы и систематизированы в рамках комплексной базы данных. Эта база данных предлагает расширенные функциональные возможности, позволяющие детально отображать эти результаты с помощью инструментов ГИС. Она предоставляет такие данные, как площадь крыши, доступная для установки солнечных систем, установленная электрическая мощность и объем вырабатываемой энергии.

Эта информация помогает определить крыши, наиболее подходящие для производства фотоэлектрической энергии. Это в значительной степени способствует принятию обоснованных решений относительно оптимального использования солнечных ресурсов в данном регионе, тем самым повышая энергоэффективность и поддерживая устойчивое развитие.

Наконец, данное исследование подробно рассматривает экономические выгоды и связанные с ними затраты на внедрение фотоэлектрических систем. Оно также точно определяет группу населения, которая потенциально может получить выгоду от производства электроэнергии, и количественно оценивает сокращение выбросов CO₂. Выходя за рамки простой оценки, этот подход исследует экономические и экологические аспекты, стремясь всесторонне понять социальные и экологические последствия проекта.

Рис. 1 иллюстрирует процесс оценки потенциала фотоэлектрической энергетики в Надоре. Это графическое представление дает наглядное изображение шагов, предпринятых для анализа и количественной оценки интеграционной способности фотоэлектрических систем в городской среде Надора. Различные этапы этого процесса представлены последовательно, что позволяет наглядно понять оптимизированный рабочий процесс, разработанный для данной конкретной оценки.

1.1. Область исследования

Надор, расположенный в северо-восточном регионе Марокко, занимает площадь 38 км² с периметром 28 км. Он является частью региона Восточный Риф в административном районе Орианаль и примыкает к лагуне Марчика. Расположенный на средиземноморском побережье

между 35°12 - 35°7 с.ш. и 2°58 - 2°54 з.д., город, согласно переписи населения и жилищного фонда 2014 года, насчитывал приблизительно 161 726 человек. Надор, демонстрирующий среднегодовой темп роста населения в 1,1% с 2004 по 2014 год, имеет средиземноморский климат, характеризующийся низким уровнем осадков и значительными колебаниями температуры от 4 до 40 °C [11]. Что касается жилья, то большинство домохозяйств в городе — это «марокканские дома», составляющие 85,7% городской территории, за которыми следуют 8,3% в категории «квартиры». Кроме того, в Надоре расположены различные коммерческие объекты, такие как торговые центры, гипермаркеты, спортивные сооружения, административные здания и другие [12]. Рис. 2 иллюстрирует географическое расположение исследуемой территории, полученное из OpenStreetMap.

1.2 Используемые данные

Данные, использованные в этом исследовании, предоставлены Агентством Надора. В связи с конфиденциальным характером этих данных, их нельзя предоставить для прямой загрузки. Исследователи, заинтересованные в доступе к этим данным, могут связаться с Агентством Надора напрямую, чтобы обсудить условия доступа.

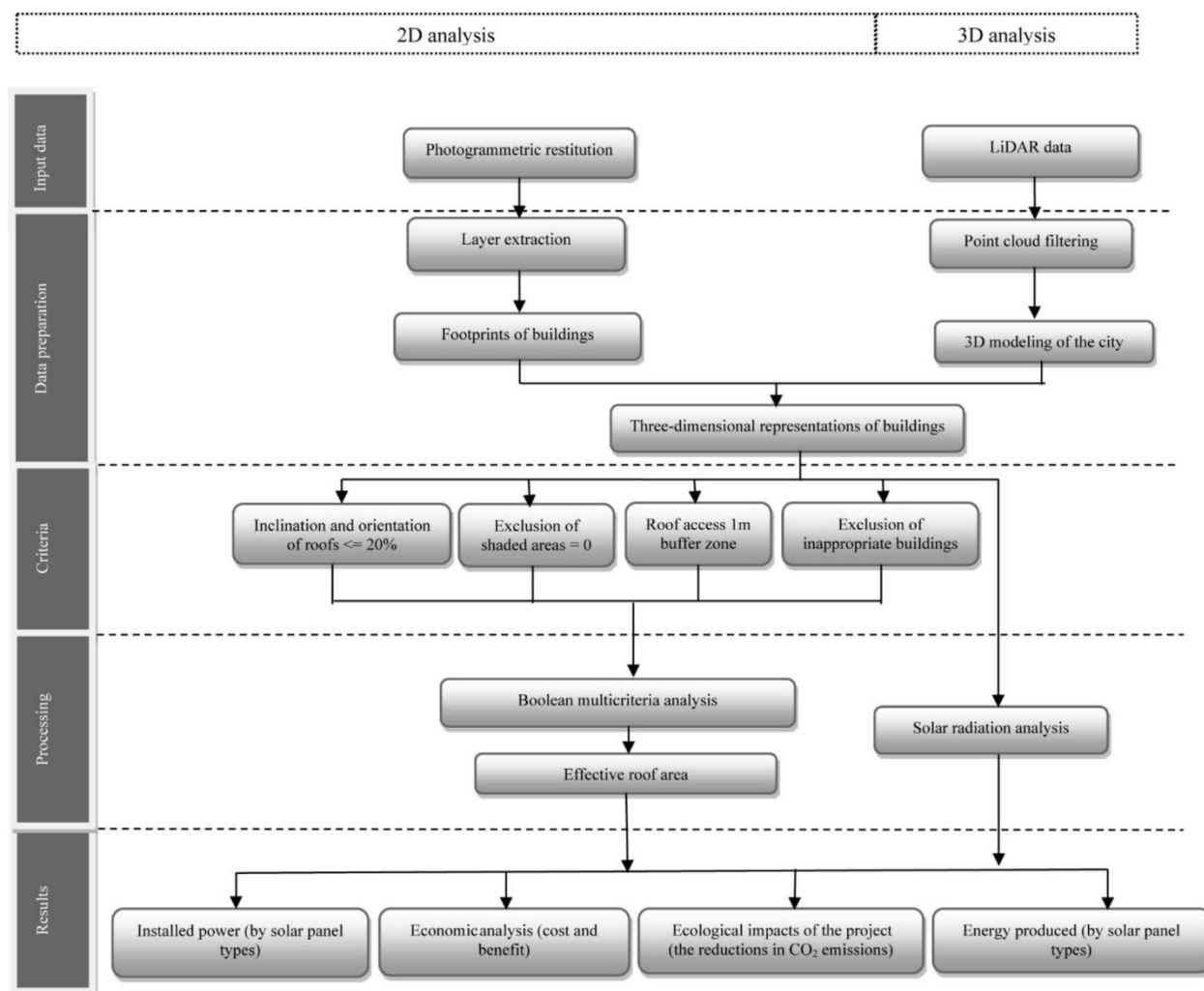


Рис. 1. Усовершенствованный алгоритм оценки фотоэлектрического (PV) потенциала в городе Надор.

1.2.1 Облако точек, полученное из данных LiDAR.

Исследование в первую очередь основано на использовании облака точек, сгенерированного на основе данных LiDAR, полученных с помощью системы LiDAR Leica Geosystem ALS 70 HA, широко

используемой для картографирования обширных географических территорий. Эти данные LiDAR были собраны в марте 2018 года, обеспечивая надежную пространственную информацию и представленные в стандартном формате LiDAR (LAS) с плотностью точек 0,8 м2.

Точность системы LiDAR варьируется, точность альтиметрии составляет 7-16 см, а точность планиметрии — 5-37 см. Эта изменчивость точности обусловлена различными факторами, включая высоту полета и место наблюдения, особенно то, находится ли оно в надире (непосредственно под самолетом) или в конце траектории полета. Эти подробности задокументированы в документе ALS70 [13]. На рис. 3 представлен фрагмент облака точек, представляющий город Надор.

1.2.2 Фотограмметрическая реконструкция

Фотограмметрическая реконструкция, внедренная в 2018 году, представляет собой сложную методологию, облегчающую фотоинтерпретацию с помощью аэрофотоснимков высокого разрешения, образующих стереоскопические пары с разрешением 20 см. Этот строгий процесс разбит на несколько этапов. Первоначально проводится аэрофотосъемка для сбора данных с воздуха, охватывающих всю исследуемую территорию. Затем проводится стереоподготовка, которая требует наземных наблюдений с использованием GNSS для определения опорных точек и обеспечения геопривязанной точности. Важнейшим последующим этапом является аэротриангуляция, которая точно позиционирует аэрофотоснимки в трехмерном пространстве. Это обеспечивает точное представление топографии и архитектуры изучаемого региона. Наконец, этап валидации завершает восстановление путем сравнения полученных результатов с реальной ситуацией на местности. Этот этап включает в себя обследование недостающих деталей и сбор топонимии, что способствует повышению точности и полноты данных.

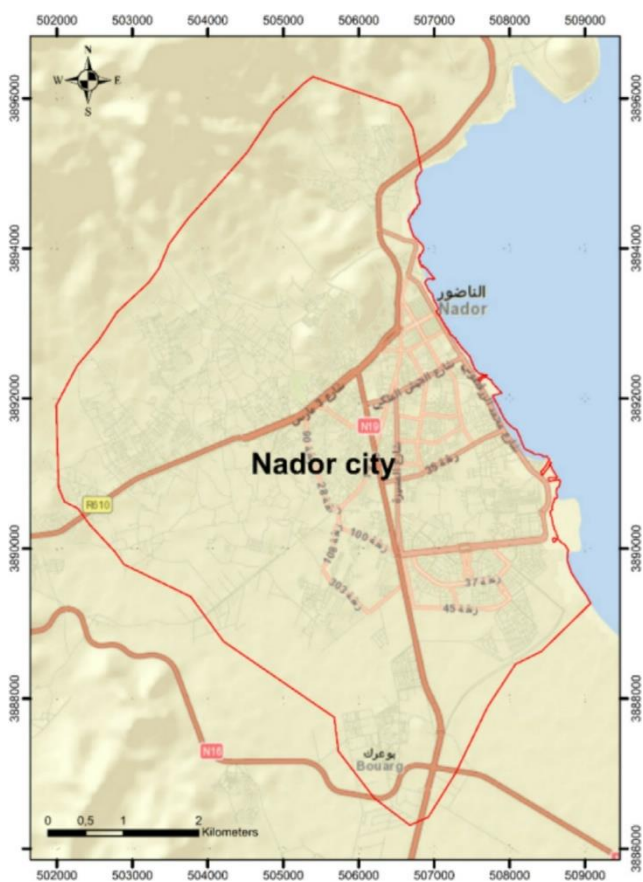


Рис. 2. Географическое положение исследуемой территории (город Надор), полученное из OpenStreetMap.

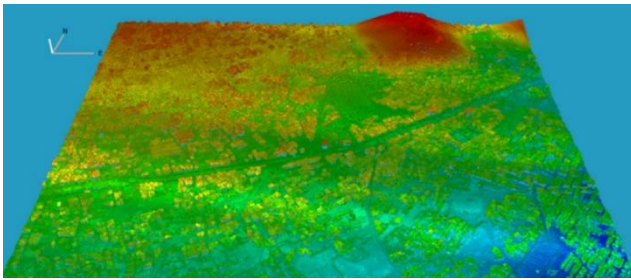


Рис. 3. Фрагмент данных LiDAR из Надора.

Цель данной методики — разработка частых фотограмметрических съемок, постоянно обогащающих набор данных подробной и точной информацией о топографии и архитектуре зданий в исследуемой области. Рис. 4 представляет собой фрагмент фотограмметрической реконструкции Надора.

1.2.3 Данные о положении Солнца из SunEarthTools

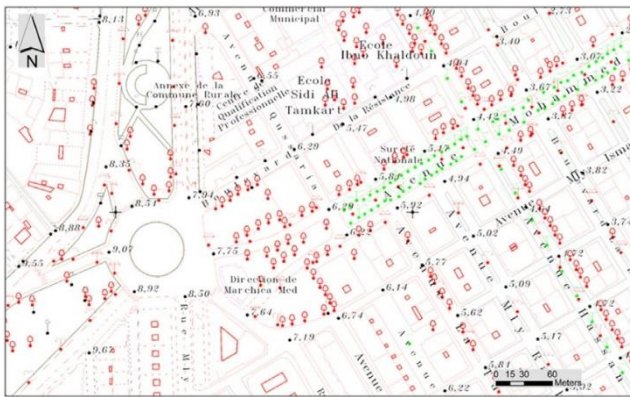


Рис. 4. Фрагмент фотограмметрической реконструкции Надора.

SunEarthTools — это всеобъемлющий ресурс, предоставляющий данные о положении Солнца. Выходя за рамки простой библиотеки данных, эта система выступает в качестве портала, объединяющего различные ресурсы из разных стран. Эта уникальная функция обеспечивает доступ к обширному спектру данных о солнечном излучении, предоставляя глобальную перспективу для исследования. Такое разнообразие источников обогащает анализ, объединяя информацию из разных регионов земного шара.

SunEarthTools предоставляет данные о высоте и азимуте солнца, что позволяет получить подробную статистику солнечной радиации на крышах. Такой подход повышает надежность и охват результатов исследования, добавляя дополнительный уровень точности и надежности к анализу эффективности солнечной энергии в изучаемых местах [14].

Общий набор данных является полным и разнообразным: данные облака точек LiDAR, полученные в 2018 году, предоставляют точную пространственную информацию, фотограмметрическая реконструкция 2018 года дает детальные изображения исследуемой территории, а данные о положении солнца из SunEarthTools позволяют получить полезную информацию о закономерностях солнечного излучения. Этот набор источников данных обеспечивает всестороннюю и надежную основу для оценки идеальных мест для солнечных электростанций и прогнозирования выработки электроэнергии в Надоре.

1.3 Подготовка данных

После аэрофотосъемки начальный этап включает извлечение информации из системы. Эта процедура начинается с расчета траектории с использованием местоположений, предоставленных

глобальной системой позиционирования и инерциальной навигационной системой, для подтверждения пространственной точности облака точек. Эта объединенная траектория подтверждает соответствие и точность облака точек географической реальности.

Файл LAS подвергается фильтрации и классификации, при этом каждой точке в облаке точек, зарегистрированном лазерными импульсами во время аэрофотосъемки, присваивается определенное числовое значение, характеризующее различную информацию, связанную с отснятой поверхностью.

После классификации облака точек данные анализируются в ArcGIS для вычисления цифровой модели поверхности (DSM) путем фильтрации набора данных LAS, с особым акцентом на точки первого отражения, то есть начальные эхо-сигналы лазерных импульсов. Затем используется программа преобразования для изменения этих отфильтрованных точек в растровый формат. Для определения значений ячеек в выходном растре используется метод интерполяции «AVERAGE», который обеспечивает создание гладкой поверхности при сохранении пространственного распределения входных элементов [15]. Указание используемого значения в сочетании с типом выборки, установленным на 1 м, определяет разрешение выходного растра, способствуя точному и детальному представлению DSM.

Основная задача — точное получение контуров зданий для аналитической интеграции. Эта процедура начинается с идентификации крыш в 2D с использованием геопривязанной векторизованной базы данных, созданной в процессе фотограмметрической обработки, на основе аэрофотоснимков, образующих стереоскопические пары.

Чтобы гарантировать сохранение только соответствующих структур в интересующей области, применяется маска для удаления ненужных элементов. Затем удаляются другие слои, а результаты экспортируются в дополнительный шейп-файл (векторный формат географических файлов), который включает в себя специфические характеристики каждого типа зданий, предоставляя важные детали для последующих этапов анализа.

Эта процедура обеспечивает не только точное извлечение контуров зданий в исследуемой области, но и их тщательную интеграцию в обширный набор данных, который служит прочной основой для углубленных исследований, предлагая детальное представление о топографии и архитектурной структуре изучаемой территории. На рис. 5 показана цифровая модель рельефа, полученная из данных LiDAR, а также контуры зданий, извлеченные с помощью фотограмметрической реконструкции.

1.4 Параметры, используемые для определения эффективной площади крыш с помощью булевого многокритериального анализа.

Для точного определения действительно пригодной для установки фотоэлектрических энергетических систем поверхности каждой крыши применяется многокритериальный анализ. Этот подход учитывает различные важные параметры, такие как уклон крыши, ее ориентация относительно солнца, влияние тени от других сооружений или препятствий, а также доступность крыши для установки и обслуживания солнечных панелей, исключая при этом неподходящие здания.

В подключенных к сети фотоэлектрических системах крайне важно определить оптимальную ориентацию солнечных модулей для оптимизации сбора энергии в течение всего года. Эта идеальная ориентация увеличивает воздействие солнечного света на солнечные панели, что напрямую влияет на общую производительность системы. Доля потерь энергии была рассчитана с использованием уравнений (1) и (2), опубликованных Институтом диверсификации и экономики энергетики [16]. Эти уравнения количественно определяют потери энергии на основе различных

параметров, таких как ориентация солнечных панелей. Применение конкретного уравнения зависит от уклона крыши, на которой установлены солнечные модули. Уклон влияет на то, как солнечный свет падает на панели, влияя на эффективность преобразования солнечной энергии в электричество.

If $\theta > 15^\circ$

$$L_e(\%) = 100 \cdot \left[1.2 \cdot 10^{-4} \cdot (\theta - \varphi + 10)^2 + 3.5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2 \right] \quad (1)$$

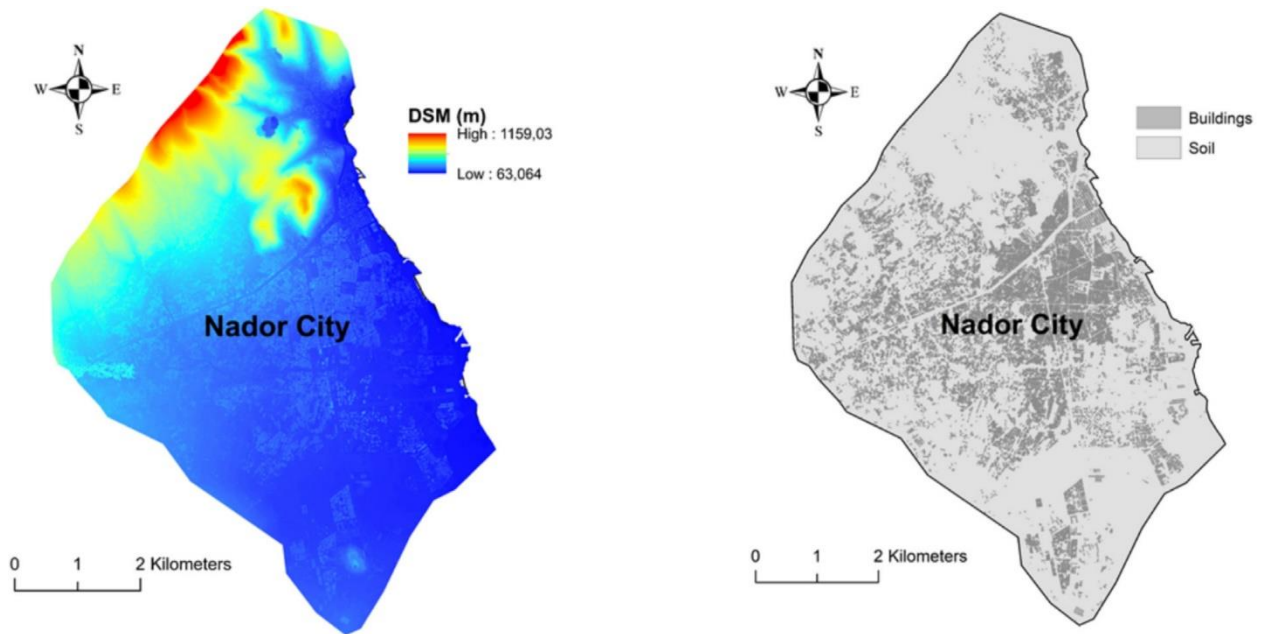


Рис. 5. Цифровая модель поверхности, полученная на основе данных LiDAR, дополненная контурами зданий, извлеченными путем фотограмметрической реконструкции Надора.

If $\theta < 15^\circ$

$$L_e(\%) = 100 \cdot [1.2 \cdot 10^{-4} \cdot (\theta - \varphi + 10)^2] \quad (2)$$

where

$L_e(\%)$ - это доля потерь энергии.

α is — это угол азимута α (ориентации).

θ - угол наклона (0° для южной ориентации, -90° для восточной ориентации и $+90^\circ$ для западной ориентации).

φ — широта местоположения, равная $35,17^\circ$ от исследуемой области. Наклон и φ выражены в градусах.

Финальный слой данных формируется путем перераспределения потерь, связанных с наклоном и ориентацией, при этом ячейкам, соответствующим потерям менее или равным 20%, присваивается значение 1, и эти ячейки сохраняются. Критерий, используемый для оценки потерь энергии, связанных с наклоном и ориентацией солнечных модулей, указан в «Основном документе НЕ5 Строительного кодекса». Согласно этим стандартам, потери в наложенных модулях не должны превышать 20% [17]. Это означает, что в случаях, когда солнечные модули установлены внахлест, общая сумма потерь от наклона и ориентации не должна превышать этот порог, обеспечивая оптимальную энергоэффективность в таких конфигурациях.

Для расчета затенения использовался инструмент «Затенение холма», который определяет область света с помощью растровой модели поверхности, учитывая положение солнца (азимут и угол возвышения). Это позволяет оценить, затенена ли зона или нет, и размер теней в определенный момент времени [18]. Годовая карта затенения для исследуемого региона оценивалась в диапазоне от 10 до 14 часов в течение всего года. Для достижения этой цели были созданы исходные карты теней для всех дней года с интервалом в 1 час; впоследствии все карты были объединены, в результате чего была получена общая годовая карта теней. В созданных растровых слоях результирующие значения теней и освещенности варьируются от 0 до 255, где затененные области имеют значение 0. Значения от 1 до 255 для каждой карты были отнесены к значению 1.

Доступ к крыше, где будут установлены солнечные модули, является важным фактором при определении эффективной полезной площади. Этот вопрос особенно важен для обеспечения регулярного технического обслуживания солнечных систем и доступа к средствам пожаротушения. Это было достигнуто с помощью инструмента «буферная зона» для слоя, представляющего здания, с целью создания зон воздействия. Вокруг крыш было выделено пространство шириной 1 м, образующее буферную зону, которая отражает пространство, необходимое для технического обслуживания и доступа к средствам пожаротушения. Этот метод эффективно удаляет нежелательные точки (выбросы или ошибки во время сбора данных) из данных LiDAR[19].

В данном исследовании термин «непригодные здания» относится к постройкам в густонаселенных районах исторической медины и пригородов города. Эти здания представляют собой в основном старые, ветхие, непригодные для использования и часто расположенные на плохих или ненадлежащих фундаментах. Из-за своего ветхого состояния эти здания непригодны для установки солнечных батарей.

Для учета этого аспекта в исследовании использовалась бинарная классификация. Зданиям, признанным непригодными, присваивалось значение 0. Зданиям, признанным пригодными для размещения солнечных установок, присваивалось значение 1. Эта классификация обеспечивает точность и надежность анализа, поскольку она помогает выбрать места, которые физически и структурно приемлемы для установки фотоэлектрических модулей в городе Надор.

1.5 Общая эффективная площадь крыш

Бинарные слои, сгенерированные с заданными ограничениями (рис. 4), были наложены друг на друга с помощью операции умножения (уравнение (3)) [20]. Целью было получение доступной и функциональной площади крыши для каждого здания, особенно тех, которые подходят для систем солнечных панелей. Эта операция наложения интегрировала различные недостатки и лимиты, оценивая целесообразность и потенциальную эффективность установки систем солнечных панелей на крышах зданий.

$$A_{ec} = \alpha \times \beta \times \gamma \times \delta \quad (3)$$

где

A_{ec} - коэффициент эффективной площади;

α и δ — это факторы наклона и ориентации;

β — это фактор тени;

γ — коэффициент доступности крыши;

δ - фактор неадекватности зданий.

Инструмент «растровый калькулятор» является важнейшим компонентом нашей методологии, облегчающим манипулирование растровыми слоями, связанными с нашими геопространственными данными [21]. Его использование приводит к созданию подробной карты, выделяющей конкретные места крыш, которые полностью соответствуют всем предопределенным условиям. Эта карта обеспечивает четкое визуальное представление, позволяя быстро идентифицировать области, где удовлетворяются необходимые критерии.

1.6 Оценка солнечной радиации

Карты солнечной радиации были созданы с помощью инструмента «Площадь солнечной радиации» в ArcGIS, сложного инструмента, предназначенного для точной оценки количества солнечной радиации, достигающей заданной поверхности в течение заданного периода [22]. Оценка радиации, выраженная в единицах глобального излучения (прямое + рассеянное), была представлена в Вт·ч/м² для каждого исследуемого региона. Этот подход учитывает колебания положения солнца, а также влияние построенных сооружений и других топографических параметров, обеспечивая точный анализ солнечной радиации [23].

Были определены следующие переменные: (35,16 ° исследовательского региона):

Широта (в градусах, положительная для северного полушария) использовалась для расчета склонения и положения Солнца. По умолчанию ее значение равно 45°, но поскольку растровый входной слой предоставляет географическую привязку, широта определяется автоматически.

Период времени, в течение которого оценивается солнечная радиация, может составлять от 1 до 365 дней.

Топографические характеристики, такие как наклон и ориентация, зависят от модели рельефа.

Доля рассеянного излучения зависит от состояния воздуха. Ее значение колеблется от 0 до 1, но обычно для ясного неба подходящим значением является 0,3.

Коэффициент пропускания — это отношение количества энергии, поглощенной атмосферой, к количеству энергии, которая в конечном итоге достигает поверхности земли. В ясную погоду его значение составляет 0,5, тогда как в погоде значения колеблются от 0 до 1 (соответственно, при отсутствии пропускания и при полном пропускании).

Для наглядного представления процесса мы включили подробное визуальное описание, представленное в виде миниатюры, на рис. 6. Эта визуальная иллюстрация подчеркивает различные этапы обработки данных, акцентируя внимание на логической последовательности операций, выполняемых в ArcGIS. Это позволяет пользователям визуально понять, как исходные данные преобразуются для создания финальной версии карты расположения крыш, соответствующей нашим требованиям. Потери в зоне доступа относятся к зоне шириной 1 м вокруг каждой крыши, при этом неблагоприятным зонам присваивается значение 0, а благоприятным — 1. Потери в неподходящих зданиях относятся к сооружениям, признанным непригодными для установки из-за таких факторов, как форма или конструкция, и им присваивается значение 0, в то время как подходящим зданиям присваивается значение 1. Потери от наклона и ориентации отражают уклон и направление крыши: 0 соответствует неблагоприятным углам, 1 — благоприятным. Потери от затенения учитывают затененные участки, которым присваивается значение 0, и незатененные участки, которым присваивается значение 1. Годовая глобальная радиация измеряет общее количество солнечной энергии, получаемой каждой крышей за год, с учетом таких факторов, как угол наклона крыши, ориентация и широта.

1.7 Установленное электропитание

В контексте подключенной к сети фотоэлектрической системы установленная мощность, выраженная в пиковых киловаттах (кВтп), для каждой технологии фотоэлектрических модулей в конкретной области определялась с помощью уравнения (4) [24]

$$P = I_g \times \eta \times A_r \quad (4)$$

где

P - это установленная мощность;

I_g является глобальным облучением = 1 кВт/м² (при стандартных условиях измерения);

η - эффективность фотоэлектрических модулей;

A_r - это доступная площадь крыши.

Каждому типу фотоэлектрических модулей был присвоен определенный показатель эффективности (таблица 1) [25].

1.8 Произведенная энергия

Общая энергия, производимая ежегодно (в кВт·ч), была оценена с использованием уравнения (5) [24]. Помимо учета эффективности фотоэлектрических модулей, еще одним важным аспектом является энергетическая эффективность установки, также известная как «коэффициент производительности» (ρ). Этот показатель оценивает качество установки с учетом таких факторов, как температура, эффективность проводки, наличие загрязнений в установке и т. д. Затем для расчета энергии было использовано уравнение (5):

$$E = I_A \times \eta \times A_r \times \rho \quad (5)$$

где

E это годовое потребление энергии (кВт·ч);

I_A — годовая глобальная солнечная радиация (кВтч/м²);

η - эффективность фотоэлектрических модулей;

A_r - доступная площадь крыши;

ρ - коэффициент производительности = 0,8 (будет применено значение PR, предполагающее оптимальное расположение системы без потерь из-за затенения).

1.9 Экономический анализ

1.9.1 Финансовая выгода

Текущие статистические данные показывают стоимость электроэнергии в крупнейших экономиках мира в июне 2022 года, выявляя значительные различия. В Соединенных Штатах тариф на электроэнергию достиг 18 центов за киловатт-час, что значительно выше по сравнению с тарифами, наблюдаемыми в Китае и России, где они составляли менее 1 цента. Во Франции потребители должны были платить 22 цента за киловатт-час, что эквивалентно 20 евроцентам. Эти цифры отражают заметное увеличение по сравнению с предыдущими годами, проливая свет на влияние энергетического кризиса, затронувшего несколько регионов мира [26].

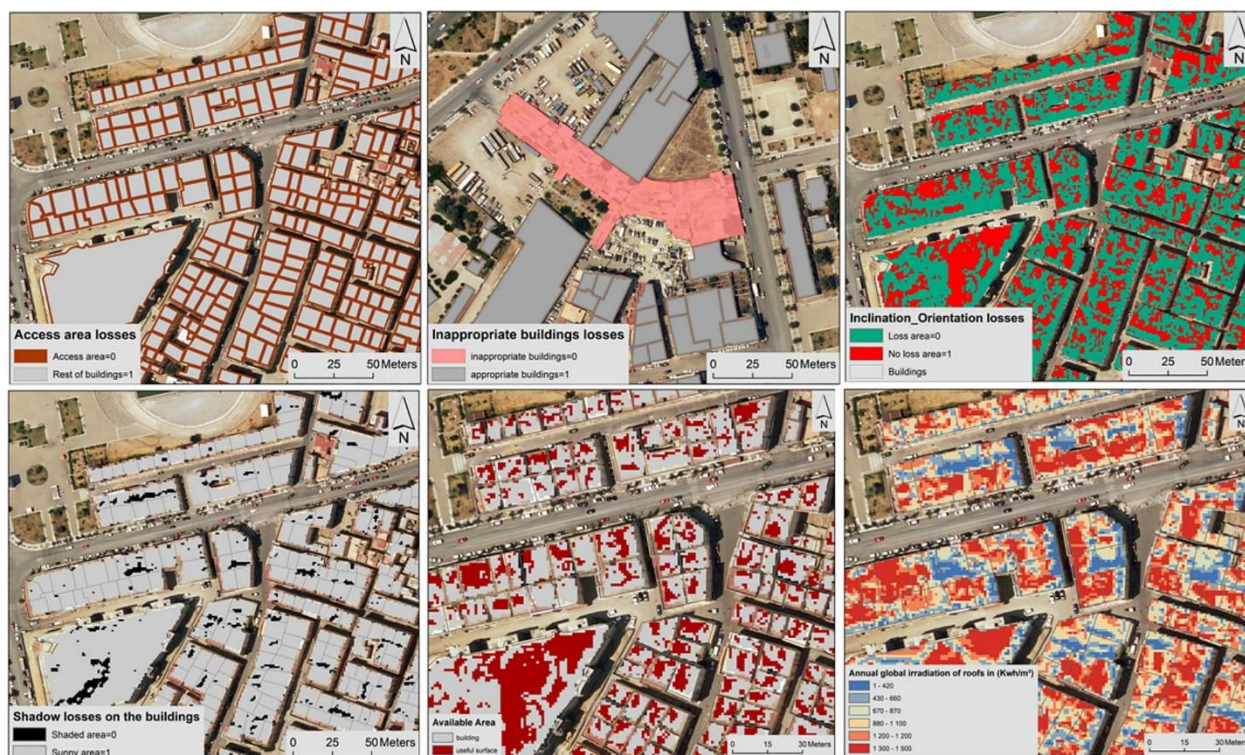


Рис. 6. Уменьшенные изображения, демонстрирующие различные этапы обработки данных.

Таблица 1. Эффективность каждого фотоэлектрического модуля [25].

Types of Photovoltaic (PV) Modules		Efficiency
Silicon crystal	Silicon monocrystalline	16%
	Silicon multicrystalline	15%
Thin film	CIS (Copper/Indian/selenide)	11%
	Te Cd (tellurid/cadmium)	10.5%
	Amorphous silicon	6%

Стоимость электроэнергии в Марокко составляет 12 центов за киловатт-час, согласно данным, предоставленным Global Petrol Prices за 2023 год [27].

Экономическая оценка в данном исследовании основана на тарифах на электроэнергию в Марокко, рассчитанных путем умножения количества произведенной энергии на цену за единицу электроэнергии. Полученное значение представляет собой доход, полученный от производства электроэнергии, и играет решающую роль в оценке эффективности и рентабельности солнечных электростанций на крышах зданий в данном регионе. Кроме того, этот анализ способствует принятию обоснованных решений в отношении инвестиций, распределения ресурсов и общей устойчивости энергетической инфраструктуры города.

1.9.2 Способность солнечных батарей на крышах удовлетворять энергетические потребности населения

Для определения количества людей, которые могут получить выгоду от производства солнечных батарей на крыше, необходимо понимать масштабы потребления энергии в Марокко. Согласно данным Всемирного банка за 2014 год [28], годовое потребление электроэнергии на душу населения в Марокко составляет 904 кВт·ч.

Разделив общее количество энергии, произведенной системой, на среднее потребление электроэнергии на душу населения, мы можем получить реалистичную оценку количества людей, которых потенциально может охватить эта система.

Этот углубленный анализ позволяет нам принимать обоснованные решения относительно проектирования, размеров и внедрения солнечных электростанций, обеспечивая их соответствие реальным энергетическим потребностям населения. Полное понимание этой взаимосвязи позволяет нам увеличивать эффективность системы и гарантировать, что она принесет ощутимую пользу значительному числу жителей города Надор.

1.9.3 Стоимость установки всей системы

На стоимость установки фотоэлектрических модулей влияют два основных фактора: установленная мощность и стоимость за пиковый ватт (\$/Втп).

Установленная мощность (в пиковых ваттах, или Втп) представляет собой суммарную мощность фотоэлектрических модулей, установленных на крышах, измеренную при их максимальной выработке электроэнергии в среднестатистических условиях.

Стоимость за пиковый ватт (\$/Втп) — это удельная стоимость за пиковый ватт, связанная с каждым типом фотоэлектрических модулей (таблица 2). Она включает в себя не только стоимость самих модулей, но и расходы, связанные с установкой, инверторами, опорными конструкциями и другими элементами системы.

Таким образом, общая стоимость установки может быть рассчитана путем умножения установленной мощности (в Втп) на стоимость за пиковый ватт (\$/Втп). Этот расчет дает оценку общей стоимости проекта на основе установленной мощности и удельной стоимости используемых модулей [29].

Крайне важно учитывать и другие сопутствующие затраты в проекте. Этого можно достичь путем выявления различных типов сопутствующих затрат, таких как оплата труда, материалы, разрешения, проектирование, техническое обслуживание и другие прочие расходы, а затем сбора соответствующих данных по каждому типу затрат, например, путем проведения местных опросов рабочей силы и получения ценовых предложений от поставщиков материалов.

Эти данные анализируются с учетом специфики проекта (местоположение, размер системы, нормативные требования) и с использованием соответствующих инструментов (электронные таблицы, программное обеспечение для управления проектами) для организации и расчета затрат. Оценки должны быть подтверждены консультациями с экспертами, сравнением с аналогичными проектами и корректировкой на основе полученных отзывов.

Такой методичный подход обеспечивает точную и всестороннюю оценку дополнительных затрат, что облегчает финансовое планирование проекта.

Таблица 2. Самая низкая стоимость за пиковый ватт для различных фотоэлектрических модулей [30].

Type of PV Cell	Price per Watt Peak/ US\$	Price per Watt Peak/ Dh
Silicium monocrystallin	1.28	12.84
Silicium polycrystallin	1.23	12.34
Silicium amorphe	1.02	10.23
Te Cd (tellurid/cadmium)	0.87	8.73
CIS (Copper/Indian/ selenide)	0.93	9.33

1.9.4 Сокращение выбросов CO₂

Определение масштабов сокращения выбросов CO₂ основано на идее, что переход на солнечную энергию может помочь уменьшить объем выбросов CO₂, возникающих в результате использования ископаемого топлива при производстве электроэнергии. Средние выбросы CO₂, связанные с использованием ископаемого топлива для производства электроэнергии, оцениваются в 280 кг CO₂ -э на мегаватт-час (МВт·ч) [31]. Для оценки этой экономии это значение использовалось в качестве коэффициента выбросов и умножалось на произведенную солнечную энергию, чтобы количественно определить экономию выбросов CO₂ для каждого здания, обеспечивая конкретную оценку положительного влияния солнечной энергии на сокращение выбросов парниковых газов. Однако этот метод имеет свои ограничения и неопределенности. Коэффициент выбросов 280 кг CO₂ -э на МВт·ч является средним значением и может не отражать конкретные выбросы различных видов ископаемого топлива или электростанций. Выбросы могут варьироваться в зависимости от состава топливной смеси, эффективности производства электроэнергии и региональных различий в энергетических технологиях. Кроме того, этот коэффициент может меняться со временем из-за технологических достижений.

Эффективность производства электроэнергии варьируется в зависимости от электростанции и технологии, а расчет экономии выбросов предполагает постоянную эффективность, что может быть неточным. Расчет сосредоточен на прямых выбросах от сжигания топлива, игнорируя косвенные выбросы от производства, транспортировки и установки солнечных панелей.

Предположение о том, что солнечная энергия полностью заменит энергию ископаемого топлива, не всегда может быть верным из-за динамики энергосистемы и проблем с хранением энергии. Изменения в политике и стимулы также могут влиять на преимущества солнечной энергии, еще больше усиливая неопределенность. Для решения этих задач необходим детальный региональный анализ, учитывающий местные энергетические балансы, технологические достижения и политическую обстановку.

2. Обсуждение полученных результатов

В данной работе был оценен вариант моделирования внедрения фотоэлектрических систем на крышах зданий в городе Надор, а также проведен экономический анализ, связанный с различными технологиями. Методология исследования включает в себя различные аналитические подходы, с особым акцентом на использование булевого многокритериального анализа. Этот подход учитывает различные факторы, определяя эффективную площадь каждой крыши для оптимизации оценки производимой энергии.

ГИС сыграла решающую роль, объединив данные LiDAR и фотограмметрии. Фотограмметрическая реконструкция предоставила информацию о контурах зданий, а данные LiDAR позволили получить подробные сведения о высоте и наклоне крыш. Эти данные были обработаны в ГИС для выбора подходящих поверхностей для установки солнечных панелей.

Ориентация и наклон крыш были ключевыми критериями исключения. Для установки солнечных панелей рассматривались только крыши, ориентированные преимущественно на юг или близко к нему, и имеющие умеренный уклон. Был проведен анализ затенения, чтобы исключить участки, которые будут постоянно затенены окружающими элементами (соседними зданиями, деревьями и т. д.) Были отобраны только крыши, получающие достаточное количество прямого солнечного света. Также учитывалась доступность крыш: вокруг каждой крыши была создана буферная зона в 1 метр для обеспечения достаточного доступа для установки и обслуживания. Крыши с затрудненным доступом были исключены из анализа. Наконец, неподходящие конструкции (старые или ветхие здания) были исключены из-за их ветхости и ограниченной возможности установки солнечных панелей.

Эти критерии были объединены в бинарный многокритериальный анализ, что позволило создать точную карту подходящих крыш.

Результаты показали, что значительная площадь в 336 га пригодна для установки солнечных батарей, что составляет 61% от общей площади, занятой существующими сооружениями. Этот анализ включает в себя комплексный расчет установленной мощности и произведенной энергии с учетом данных, зафиксированных в таблице характеристик, связанных с кровельным слоем. Помимо технических соображений, он также включает в себя тщательный экономический анализ.

Экономический анализ включает в себя различные параметры, такие как количество пользователей системы, ожидаемая экономическая выгода и общая стоимость проекта. Эти финансовые аспекты были изучены и сгруппированы по каждому типу солнечных модулей, чтобы понять экономические последствия, специфичные для каждой используемой технологии. Таблица 3 дает целостное представление о технических характеристиках и экономических аспектах проекта, тем самым способствуя принятию обоснованных решений.

Таблица 3 была создана на основе таблицы атрибутов крыш, где каждый параметр был рассчитан с помощью инструментов полевого калькулятора Arc-GIS. Процесс включал в себя вычисление отдельных значений для каждого параметра непосредственно в ArcGIS, после чего вся таблица была экспортирована в текстовом формате. Затем полученные данные были введены в Excel для выполнения окончательных расчетов сумм по каждому параметру. Такой подход позволил обеспечить точное агрегирование и представление данных.

Представленные в таблице подробные данные обеспечивают всестороннюю основу для проведения углубленного сравнительного анализа характеристик каждого типа фотоэлектрических модулей. Этот анализ имеет решающее значение для принятия обоснованных стратегических решений, поскольку он предлагает подробный обзор различных аспектов каждого варианта, позволяя формировать стратегии, соответствующие конкретным приоритетам и ключевым целям проекта или бизнеса. Изучение каждого типа модуля в отдельности выявляет несколько ключевых моментов.

Благодаря высокой установленной мощности в 337,54 МВт и существенной выработке энергии в 452,88 ГВт·ч, монокристаллический кремний выделяется наибольшей годовой прибылью в размере 54,35 млн долларов США. Однако его первоначальная стоимость также является самой высокой, требуя 13 лет для окупаемости инвестиций. Тем не менее, он обеспечивает наибольшее сокращение выбросов CO₂, что делает его предпочтительным выбором для тех, кто ценит долгосрочную устойчивость.

Предлагая баланс между установленной мощностью, производством энергии и ежегодной прибылью, кремниевые мультикристаллические батареи представляют собой жизнеспособный вариант. Хотя их первоначальная стоимость высока, для окупаемости инвестиций требуется 12 лет. Этот вариант также демонстрирует значительное снижение выбросов CO₂.

Фотоэлектрические модули CIS представляют собой особенно привлекательный вариант, предлагающий практически идеальный баланс между финансовой рентабельностью и экологической устойчивостью.

Благодаря высокой установленной мощности в 168,56 МВт и существенному объёму произведённой энергии в 311,35 ГВт·ч, модуль CIS позиционируется как высокоэффективное решение с точки зрения энергоотдачи. Кроме того, его относительно умеренная первоначальная стоимость проекта в 376,95 млн долларов США делает его финансово привлекательным. Это способствует достижению финансовой рентабельности в течение 10 лет, что является разумным сроком по сравнению с другими вариантами.

Что касается экологической устойчивости, то технология CIS демонстрирует существенное снижение выбросов CO₂, тем самым способствуя смягчению своего воздействия на окружающую среду. Другие варианты, такие как монокристаллический кремний, могут обеспечить более значительное снижение выбросов CO₂.

Таблица 3. Глобальный статистический анализ солнечной энергии в городе Надор на основе различных фотоэлектрических модулей с использованием таблицы характеристик крыш.

Types of PV Modules	Power installed/ MWp	Energy produced/ GWh	People covered	Monetary gain per year in million/USD	Cost of the project in million/USD	Number of years to offset the installation cost	Reductions in CO ₂ emissions in tons
Silicon monocrystalline	337.54	452.88	500,969	54.35	688.05	13	126,805
Silicon multicrystalline	268.95	424.57	469,659	50.95	619.85	12	118,880
CIS (copper/indian/selenide)	168.56	311.35	344,416	37.36	376.95	10	87,179
Te Cd (telluride/cadmium)	134.76	297.20	328,761	35.66	306.90	9	83,216
Amorphous silicon	100.58	169.83	187,863	20.38	187.47	9	47,552

Несмотря на меньшую установленную мощность, Te Cd обеспечивает существенное производство энергии и более короткий срок окупаемости затрат на установку (9 лет). Он также демонстрирует заметное снижение выбросов CO₂.

Благодаря меньшей установленной мощности, аморфный кремний обеспечивает относительно более низкие проектные затраты и ежегодную финансовую выгоду. Время, необходимое для окупаемости затрат на установку, составляет 9 лет, и он демонстрирует заметное снижение выбросов CO₂. Этот вариант может подойти тем, кто ищет компромисс между первоначальными затратами и финансовой отдачей.

Выбор подходящей фотоэлектрической технологии требует комплексного баланса между различными критериями, включая финансовую рентабельность, экологическую устойчивость и контекстуальные факторы, специфичные для каждого проекта. В данном исследовании модуль CIS был представлен как наилучший вариант благодаря его превосходным характеристикам с точки зрения выработки энергии и долговечности. Действительно, панели CIS известны своей эффективностью даже в условиях низкой освещенности и способностью адаптироваться к различным типам крыш, что делает их разумным выбором для установки в городских условиях.

Двусторонние фотоэлектрические панели в данном исследовании не рассматривались. На их производительность в значительной степени влияет отражательная способность поверхности земли, аспект, который трудно контролировать в городской среде, где поверхности могут быть разнообразными и неоптимальными для улавливания света. Однако их потенциал оптимизации можно было бы изучить в будущих исследованиях, в частности, путем анализа их производительности в конкретных областях, где отражательная способность более благоприятна. Это могло бы открыть возможности для повышения производства солнечной энергии даже в городских условиях.

Энергия, вырабатываемая различными фотоэлектрическими системами, значительно превышает энергетические потребности гораздо большего числа людей, чем общая численность населения Надора, ранее составлявшая 161 726 жителей. Другими словами, мощность производства солнечной энергии существенно превышает расчетный спрос на энергию городского населения. Это наблюдение имеет решающее значение, учитывая различные другие энергетические потребности города, выходящие за рамки бытового использования. Эти потребности охватывают такие важные сектора, как промышленность и государственные учреждения.

Согласно данным Высшего комиссариата по планированию, Регионального управления Востока [32], годовое чистое производство гидро- и тепловой энергии в регионе составляет 3 860 миллионов кВт·ч (3,86 ТВт·ч). Для сравнения, монокристаллические солнечные панели, наиболее эффективный тип, производят 452,88 ГВт·ч в Надоре, что составляет 11,74% от общего регионального производства.

Предполагаемая ежегодная денежная выгода от солнечной энергии в Надоре составляет 54,35 млн долларов США. Учитывая ВВП Марокко, который составляет 1400 миллиардов дирхамов (155,56 млрд долларов США) [33], эта выгода представляет собой значительный вклад в местную экономику.

Солнечные панели в Надоре помогают сократить ежегодные выбросы CO₂ на 126 805 тонн. Для сравнения, общие выбросы CO₂ Марокко в 2020 году составили 66 720 кт [34], а это значит, что солнечная электростанция в Надоре может сократить национальные выбросы CO₂ на 0,19%, что является важным шагом на пути к достижению экологических целей страны.

Для установки монокристаллических солнечных панелей в Надоре время, необходимое для окупаемости первоначальных затрат, оценивается примерно в 13 лет. Эта продолжительность сопоставима с другими фотоэлектрическими проектами в Марокко, такими как проекты в Айн-Бени-Матар и Лаа-Юн, где сроки окупаемости варьируются в зависимости от используемой технологии, производственной мощности и местных условий солнечного света. Например, такие проекты, как Нур Уарзазат в Уарзазате, окупались за 10 лет благодаря своему масштабу и передовой технологии концентрированной солнечной энергии [4]. Аналогичным образом, проекты в Бенгерире и Лаа-Юне демонстрируют схожие сроки окупаемости, что отражает преимущества интенсивного солнечного света и конкурентоспособные затраты на установку в этих регионах. Таким образом, инвестиции в солнечные панели в Надоре открывают благоприятные долгосрочные перспективы прибыльности, чему способствуют благоприятные климатические условия и потенциальная интеграция в стратегии местного экономического развития.

Собранные данные были интегрированы в базу данных ГИС, что помогло в обработке информации в пространственном масштабе. Эта база данных служит важнейшим ресурсом, позволяющим создавать подробные карты, на которых выделены крыши, наиболее подходящие для установки солнечных фотоэлектрических панелей, а также определены крыши с более низкой эффективностью.

Эти данные составляют основу для разработки более точного солнечного кадастра, учитывающего не только уровни солнечной радиации, но и эффективную площадь каждой крыши. Этот усовершенствованный солнечный кадастр фокусируется на различных типах фотоэлектрических модулей, что позволяет проводить дифференцированный анализ на основе специфических характеристик каждого модуля.

Рис. 7 дополняет этот подход, предоставляя подробное визуальное представление производства энергии, в частности, с акцентом на модуль CIS в городе Надор. Эта визуализация добавляет осязаемое измерение к энергоэффективности установок, предлагая углубленное понимание конкретного вклада этого типа модулей в производство энергии в регионе.

Данное исследование вносит значительный вклад в область планирования городской солнечной энергетики, интегрируя технический, экономический и пространственный анализ в комплексную структуру. Сочетание данных LiDAR и фотограмметрической реконструкции для создания точных 3D-моделей застроенной среды позволяет провести детальную оценку пригодности крыш для установки фотоэлектрических систем, учитывая такие важные факторы, как уклон, ориентация, затенение и доступность. Кроме того, в исследовании сравнивается экономическая эффективность

различных фотоэлектрических технологий, что позволяет получить представление об экономической целесообразности, производстве энергии и рентабельности инвестиций.

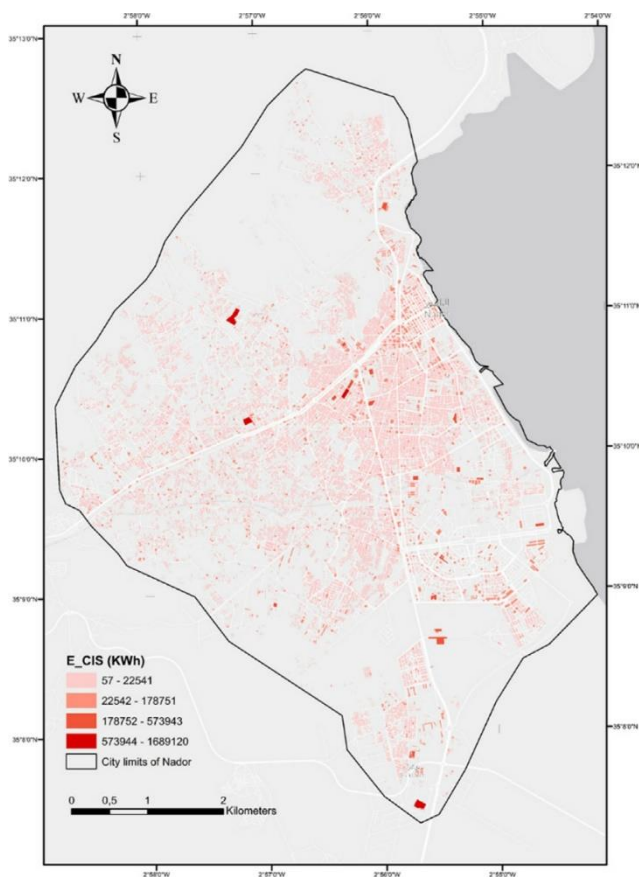


Рис. 7. Карты результатов производства энергии модулем CIS (медь-индий-селен) в городе Надор.

Представленная в данном исследовании методология обладает высокой адаптивностью и может быть применена к другим регионам со схожей городской средой. Используя широкодоступные инструменты ГИС и данные дистанционного зондирования, этот подход может помочь планировщикам и политикам в определении оптимальных мест для установки фотоэлектрических систем, даже в районах с различными географическими или климатическими условиями. Такая адаптивность подчеркивает более широкое значение данного исследования, предлагая практичную и воспроизводимую основу для продвижения интеграции солнечной энергии в городскую среду по всему миру. Кроме того, этот метод может стать основой для разработки подробных солнечных кадастров в других городах, способствуя локализованному и эффективному планированию энергоснабжения.

Однако следует признать наличие определенных недостатков. Во-первых, точность анализа в значительной степени зависит от качества используемых данных LiDAR и фотограмметрии. В регионах, где такие данные недоступны или имеют более низкое качество, методология может быть применима не столь эффективно. Во-вторых, экономические оценки, такие как затраты на установку и техническое обслуживание, а также прогнозы рентабельности, основаны на предположениях, специфичных для изучаемого контекста. Эти параметры могут значительно различаться в разных регионах, что влияет на дальнейшее использование результатов. В-третьих, хотя в исследовании учитываются такие факторы, как уклон, ориентация и затенение, другие потенциально важные аспекты, такие как несущая способность кровельных конструкций или местные нормативные ограничения, не были включены, что может сузить область применения в конкретных условиях. Наконец, исследование сосредоточено исключительно на использовании

крыш зданий и не рассматривает другие возможности, такие как использование незастроенных земель или городской инфраструктуры, например, парковок и общественных пространств.

В заключение, данное исследование предлагает надежный и адаптируемый методологический подход, однако его результаты следует интерпретировать с осторожностью, учитывая выявленные недостатки и ограничения. Эти обсуждения расширяют понимание последствий применения данного исследования и проливают свет на его потенциальный вклад в другие области.

3. Заключение

Данное исследование представляет собой важный шаг в использовании солнечных ресурсов Надора для повышения энергоэффективности города. В нем рассматривается интеграция фотоэлектрических панелей на крышах, а также проводится экономический анализ этой технологии. Методология основана на многокритериальном анализе географических факторов с использованием ГИС для определения наиболее подходящих мест для установки солнечных панелей, с учетом таких факторов, как уклон, ориентация, затенение и доступность крыш.

В отличие от предыдущих исследований, данное исследование выделяется тем, что интегрирует как техническую, так и экономическую оценку в пространственную структуру. Использование данных LiDAR и фотограмметрии для создания 3D-моделей города позволяет провести углубленное сравнение различных типов солнечных панелей, принимая во внимание эффективность, стоимость установки, долгосрочное производство энергии и окупаемость инвестиций.

Результаты показывают, что 336 га крыш, что составляет 61% от общей площади крыш в Надоре, пригодны для установки солнечных батарей. Модуль CIS выделяется своим балансом между рентабельностью и экологической устойчивостью, предлагая установленную мощность 168,56 МВт и производство энергии 311,35 ГВт·ч. Его окупаемость достигается в течение 10 лет, и он значительно сокращает выбросы CO₂.

В заключение, данное исследование предоставляет важные данные для принятия стратегических решений в отношении солнечной энергии и поддерживает переход к надёжным энергетическим решениям в Надоре. Оно прокладывает путь к более экологичному энергетическому будущему, способствуя более устойчивому развитию города.

О конфликте интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных связей, которые могли бы повлиять на результаты работы, представленной в данной статье.

Благодарности

Мы выражаем глубокую благодарность Управлению городского развития Надора, которое любезно предоставило для этого исследования важнейшие картографические данные и данные LiDAR. Их вклад имел важнейшее значение для успешного проведения нашего исследования. Мы также выражаем искреннюю благодарность всей академической команде Лаборатории фундаментальных и прикладных геонаук факультета естественных наук Айн-Чок Университета Хасана II. Их неоценимая помощь и постоянная поддержка были бесценны. Предоставление ими ресурсов и оборудования сыграло решающую роль в продвижении наших исследовательских работ. Кроме того, мы выражаем благодарность Высшей нормальной школе Рабата, в частности г-ну Абделлатифу ААРАБУ, координатору сектора (картография, геология и геоматика). Их помощь и плодотворные дискуссии внесли значительный вклад в качество этого исследования. В заключение, эта поддержка имела решающее значение для успеха наших исследований, и мы выражаем благодарность всем лицам и учреждениям, которые прямо или косвенно способствовали завершению этой работы.

Список используемой литературы

- [1] К.О. Йоро, М.О. Дарамола, Источники выбросов CO₂, парниковые газы и эффект глобального потепления, в: Достижения в области улавливания углерода, Woodhead Publishing, 2020, стр. 3-28.
- [2] А. Шахсавари, М. Акбари, Потенциал солнечной энергии в развивающихся странах для сокращения выбросов, связанных с энергетикой, *Renew.Sustain.Energy Rev.*90 (2018) 275-291.
- [3] М. Энзили, Возобновляемые источники энергии в Марокко, Семинар по методологии разработки плана развития солнечной энергетики в восточной Уджде, с 19 по 22 марта 2012 г., Национальное агентство по развитию возобновляемых источников энергии и энергоэффективности (ADEREE), 2012.
- [4] Марокканское агентство по устойчивой энергетике (MASEN), Марокканский план развития солнечной энергетики, 2021. Доступно по адресу <https://www.masen.ma/>.
- [5] Всемирный банк, Проект «Нур Лаайун», 2021. <https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/project-detail/P111172>.
- [6] Ю.Ан, Т.Чен, Л.Ши, К.К.Хенг, Ж.Фан, Потенциал солнечной энергии с использованием данных об окружающей среде городских жилых районов на основе ГИС: тематическое исследование Шэньчжэня, Китай, *Sustain.Cities Soc.*93 (2023) 104547.
- [7] А.Д.Сакти, К.Т.Н.Ихсан, Т.С.Анггрейни, З.Шабрина, Н.А.Сасонгко, Р.Фахризал, К.Виканцика, Многокритериальная оценка развёртывания городских солнечных фотоэлектрических систем на крышах: тематическое исследование Бандунга, Индонезия, *Remote Sens.*14 (12) (2022) 2796.
- [8] Д. Гоули, П. Маккензи, Исследование пригодности ГИС и наборов данных дистанционного зондирования для моделирования фотоэлектрических систем на крышах зданий, *Energ.Build.*265 (2022) 112083.
- [9] Х. Рен, Ч. Сюй, З. Ма, Ю. Сунь, Новая интегрированная 3D-географическая информационная система и глубокое обучение для высокоточной характеристики потенциала солнечной энергии на крышах зданий в городах с высокой плотностью населения, *Appl.Energy* 306 (2022) 117985.
- [10] Б. Ранджгар, А. Никколаи, Оценка потенциала производства электроэнергии с помощью крупномасштабных солнечных фотоэлектрических систем на крышах: тематическое исследование для столичного региона Тегерана, Иран, *Energies* 16 (20) (2023) 7111.
- [11] Climate-Data, Надор, Марокко - Climate-Data.org, 2024. Получено с <https://fr.climate-data.org/afrique/maroc/nador/nador-764490/>.
- [12] НСР, Высшая комиссия по планированию. Монография провинции Надор, 2014. Получено в 2024 году с www.hcp.ma/regionorientale.
- [13] Leica ALS70 - бортовые лазерные сканеры — производительность для различных применений. <http://leica-geosystems.com/products/airbornesystems/LiDAR/leica-als70-airborne-laser-scanner>.
- [14] S.E.Tools, инструменты Солнца и Земли. Из Sun Earth Tools, 2018. https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php#top.
- [15] ArcGIS Desktop, Создание растровых ЦМР и ЦСМ из больших наборов точек LiDAR. ArcMap 10.8, архив справки, 2024. Получено с <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/LiDAR-solutions-creating-rasterdems-and-dsms-from-large-LiDAR-point-collections.htm>.
- [16] IDEA, Институт диверсификации и энергосбережения. Технические характеристики установок, подключенных к сети. PROGENSA, 2011.

- [17]BD, Основной документ Н.Е., Нормативно-техническое строительство. Основной документ НЕ. Энергосбережение, в: Министерство развития, 2009.
- [18]Т.Хонг, М.Ли, Ч.Ку, Дж.Ким, К.Чжон, Оценка доступной площади крыши для установки солнечной фотоэлектрической (PV) системы на крыше путем анализа тени здания с использованием анализа затенения холма, Energy Procedia 88 (2016) 408-413.
- [19] Д. Палмер, И. Коул, Т. Беттс, Р. Готтшалг, Оценка потенциала установки фотоэлектрических панелей на крышах путем извлечения данных об угле наклона крыши из данных лазерного сканирования и агрегирования с данными переписи населения, IET Renew.Power Gener. 10 (4) (2016) 467-473.
- [20] Ф.М.И. Флора, Н. Донатьен, Р. Тчинда, О. Хаманджода, Выбор мест для ветропарков на основе ГИС с использованием булевого метода: оценка случая Камеруна, J.Power Energy Eng. 9 (1) (2021) 1-24.
- [21] ArcGIS Desktop, Растровый калькулятор. ArcMap 10.8, Архив справки, 2024. Получено с <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/raster-calculator.htm>.
- [22] С.А.Ф.С.А.Рахман, К.Н.А.Маулуд, Х.Хассан, Использование LiDAR для повышения устойчивости умных городов к изменению климата: тематическое исследование солнечного потенциала в развивающемся регионе, в: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, том 1167, № 1, IOP Publishing, 2023, стр. 012023.
- [23] Библиотека справки ArcGIS, Солнечное излучение на площади (Spatial Analyst). Ресурсный центр ArcGIS, 2023. Доступно 25.02.2020 по адресу: <http://resources.arcgis.com>.
- [24] Л.К. Вигинтон, Х.Т. Нгуен, Дж.М. Пирс, Количественная оценка потенциала солнечных фотоэлектрических систем на крышах для региональной политики в области возобновляемой энергии, Comput.Environ.Urban Syst. 34 (2010) 345-357.
- [25] Н.М. Чивелет, Интеграция фотоэлектрической энергии в зданиях, Progenisa, 2011.
- [26] Исследовательский отдел Statista, Statista, 2023. Получено с <https://fr.statista.com/a-propos/notre-engagement-pour-larecherche>.
- [27] Мировые цены на бензин, цены на электроэнергию - Марокко, 2023. https://fr.globalpetrolprices.com/Morocco/electricity_prices/.
- [28] Международное энергетическое агентство, Энергетическая статистика и балансы стран, не входящих в ОЭСР, и энергетическая статистика стран-членов ОЭСР, статистика МЭА, 2015. <https://iea.org/stats/index.asp>.
- [29] Т. Гомес-Наварро, Т. Браццини, Д. Альфонсо-Солар, К. Варгас-Сальгадо, Анализ потенциала производства фотоэлектрических панелей на крышах: техническая, экономическая и экологическая оценка для города Валенсия (Испания), Renew.Energy 174 (2021) 372-381.
- [30] Х.Н. Афрузия, С.В. Машака, З. Абдул-Малека, К. Мехранзамира, Б. Салимия, Расчет размеров солнечной батареи и аккумулятора для фотоэлектрического здания в Малайзии, J.TeknoI.(Sci.Eng.) 64 (2013) 79-80.
- [31] В.Квашнинг, Понимание систем возобновляемой энергии.2, Earthscan/Routledge London, Лондон, 2016, ISBN 978-1844071289.
- [32] НСР, Верховная комиссия по планированию, Восточный региональный директорат. Монография провинции Надор. Королевство Марокко, 2017. Получено с <http://www.hcp.ma/region-oriental>.

[33] Всемирный банк, ВВП (в текущих долларах США) – Марокко, 2024 г.
<https://donnees.banquemondiale.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?locations=MA>.

[34] Всемирный банк, Выбросы CO₂ (кт) – Марокко, 2023.
<https://donnees.banquemondiale.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT?locations=MA>.

Получено 30 мая 2024 г.; отредактировано 12 декабря 2024 г.; принято 3 января 2025 г.

*** Ответственный автор**

Адреса электронных почт: rachid.lambarki-etu@etu.univh2c.ma (Р. Ламбарки).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 4, 2025 г. Оригинальное название статьи:< Assessing the technical and economic potential of rooftop solar panels in Nador, Morocco, using advanced GIS methodology and remote sensing data>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2025.01.010>

2096-5117/© 2025 Global Energy Interconnection Group Co.Ltd. Издательские услуги предоставлены Elsevier B.V. от имени KeAi Communications Co.Ltd. Данная статья находится в открытом доступе и распространяется по лицензии CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Ламбарки Рашид получил степень бакалавра в области картографии, геологии и геоматики в Высшей нормальной школе Рабата в 2016 году, степень магистра в области ГИС и землеустройства на факультете естественных наук Аин Чок Университета Хасана II в Касабланке в 2018 году, а также степень доктора наук в области геоматики и окружающей среды на том же факультете в 2025 году. В настоящее время он работает инженером-геоматиком в Управлении картографии. Его научные интересы включают в себя геоматику, возобновляемую энергетику и окружающую среду.