

К.Ж. Кушербай *, А.Н. Мусагалиева 

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: kosherbay822@mail.ru

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА КРЫШАХ ЗДАНИЙ В ГОРОДЕ АЛМАТЫ НА БАЗЕ ГИС

Казахстан обладает большим потенциалом солнечной энергии, в котором технология фотоэлектрической (PV) энергии быстро развивается в стране, и инвесторы заинтересованы в строительстве фотоэлектрических электростанций. Строительство фотоэлектрических электростанций на крыше может сэкономить ежемесячные затраты на электроэнергию для владельцев и может продавать избыточную электроэнергию с фотоэлектрической электростанции в электросеть, чтобы получить экономические выгоды. Целью научного исследования являлась демонстрация эмпирических знаний в сфере геоинформационных технологий с последующим применением в директиве интеграции альтернативных источников энергии в повседневную деятельность. Научная значимость работы обосновывалась повсеместным переходом к новым веяниям обеспечения электроэнергией городов и прилегающих агломераций, что перетекали в необходимость практического обоснования с применением техник статистического анализа пространственных данных на основе ГИС. Методология исследования заключалась в первичной интеграции технологии Lidar для получения и обработки информации ДЗЗ при помощи активных оптических систем, что в свою очередь добавляют данные по явлениям отражения света от земной поверхности с обозначением X, Y и Z координат. Основным результатом данной работы является идентификация подходящих поверхностей зданий для последующего монтажа солнечных панелей для выработки «чистой» электроэнергии, а выводом намечен обоснованный потенциал к разгрузке ТЭЦ-2 с возможностью интеграции источников солнечной энергетики. Ценность данного исследования фокусировалась на необходимости улучшить качество жизни жителей города Алматы, т.к. переход к элементам зеленой энергетики позволит улучшить экологическую составляющую, а точнее снизить нагрузку на станцию, зольность топлива которой составляет 40%.

Ключевые слова: Возобновляемые источники энергии (ВИЭ), солнечная фотоэлектрическая (PV) система, геоинформационная система, солнечный потенциал, дистанционное зондирование, солнечные панели, геопространственные данные, статистический анализ, картография, пространственный анализ и наука о данных, электрические инженерные сети.

K.Z. Kosherbay*, A.N. Mussagaliyeva

Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: kosherbay822@mail.ru

The Technical Potential of the Solar Photovoltaic System on the Roofs of Buildings in Almaty on the Basis of Gis

Kazakhstan has a great potential for solar energy, in which photovoltaic (PV) energy technology is rapidly developing in the country, and investors are interested in the construction of photovoltaic power plants. The construction of photovoltaic power plants on the roof can save monthly electricity costs for owners and can sell excess electricity from the photovoltaic power plant to the electricity grid to gain economic benefits. The purpose of the research is to demonstrate empirical knowledge in the field of geoinformation technologies with subsequent application in the directive of the integration of alternative energy sources into everyday activities. The scientific significance of the work is justified by the widespread transition to new trends in providing electricity to cities and adjacent agglomerations, which translates into the need for practical justification using techniques of statistical analysis of spatial data based on GIS. The research methodology consists in the primary integration of Lidar technology for obtaining and processing remote sensing information using active optical systems, which in turn adds data on the phenomena of light reflection from the Earth's surface with the designation of X, Y and Z coordinates. The main result of this work is the identification of suitable building surfaces for the subsequent installation of solar panels to generate "clean" electricity, and the conclusion outlines a reasonable potential for unloading a thermal power plant with the possibility of integrating solar energy sources. The value of this study focuses on the need to improve the quality of life of residents of Almaty, because the

transition to elements of green energy will improve the environmental component, or rather reduce the load on the station, the ash content of which is 40%.

Key words: Renewable energy sources (RES), solar photovoltaic (PV) system, geoinformation system, solar potential, remote sensing, solar panels, geospatial data, statistical analysis, remote sensing, cartography, spatial analysis and data science, electrical engineering networks.

Қ.Ж. Көшербай*, А.Н. Мусағалиева

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: kosherbay822@mail.ru

ГАЗ негізінде Алматы қаласындағы ғимараттардың шатырларындағы күн фотоэлектрлі жүйенің техникалық әлеуеті

Қазақстанда күн энергиясының үлкен әлеуеті бар, онда фотоэлектрлік (PV) энергия технологиясы елде тез дамып келеді және инвесторлар фотоэлектрлік электр станцияларын салуға мүдделі. Шатырлы фотоэлектрлік электр станцияларын салу иелері үшін ай сайынғы энергия шығындарын үнемдеуге мүмкіндік береді және экономикалық пайда алу үшін фотоэлектрлік электр станциясынан электр желісіне артық электр энергиясын сата алады. Ғылыми зерттеудің мақсаты баламалы энергия көздерін күнделікті қызметке интеграциялау директивасында кейіннен қолдану арқылы геоақпараттық технологиялар саласындағы эмпирикалық білімді көрсету болып табылады. Жұмыстың ғылыми маңыздылығы қалалар мен іргелес агломерацияларды электр энергиясымен қамтамасыз етудің жаңа үрдістеріне жаппай көшумен негізделеді, бұл ГАЗ негізінде кеңістіктік деректерді статистикалық талдау техникаларын қолдана отырып, практикалық негіздеу қажеттілігіне алып келеді. Зерттеу әдіснамасы белсенді оптикалық жүйелердің көмегімен ЖҚЗ ақпаратын алу және өңдеу үшін lidar технологиясын бастапқы интеграциялаудан тұрады, бұл өз кезегінде X, Y және Z координаттарын белгілей отырып, жер бетінен жарықтың шағылысу құбылыстары бойынша деректерді қосады. Бұл жұмыстың негізгі нәтижесі «таза» электр энергиясын өндіру үшін күн панельдерін кейіннен орнату үшін ғимараттардың қолайлы беттерін анықтау болып табылады, ал қорытынды күн энергиясын көздерін біріктіру мүмкіндігімен ЖЭО-2-ні түсіруге негізделген әлеуетті көрсетеді. Бұл зерттеудің құндылығы Алматы қаласы тұрғындарының өмір сүру сапасын жақсарту қажеттілігіне негізделеді, өйткені жасыл энергетика элементтеріне көшу экологиялық компонентті жақсартуға, дәлірек айтқанда станцияға жүктемені азайтуға мүмкіндік береді, отынның күлділігі 40% құрайды.

Түйін сөздер: жаңартылатын энергия көздері (ЖЭК), күн фотоэлектрлік (PV) жүйесі, геоақпараттық жүйе, күн потенциалы, қашықтықтан зондау, күн панельдері, геокеңістіктік деректер, статистикалық талдау, қашықтықтан зондау, картография, кеңістіктік талдау және деректер туралы ғылым, электрлік инженерлік желілер.

Введение

В данном исследовании количественно оценен технический потенциал фотоэлектрических (photovoltaic – PV) систем, что потенциально могут быть развернуты на крышах зданий в границах города Алматы для последующей оценки выработки электроэнергии при установке фотоэлектрических систем (солнечных панелей) на всей подходящей площади крыши. Результаты исследования не исключали системных расчетов, что основывались на их экономических показателях, но имели обоснование потенциального развертывания, а не прогноз фактического развертывания.

В нижеприведенном исследовании рассматривались три ключевых направления – о потенциале возобновляемых источников энергии и целевых показателях использования возобновляемых источников энергии, технологических вариантах и планировании городских энергетических систем, что позволят городам расши-

рить использование местных возобновляемых источников энергии по мере их перехода к декарбонизации своих энергетических систем. Установление целевых показателей в области возобновляемых источников энергии является важным компонентом усилий городских властей по расширению использования возобновляемых источников энергии. Однако установление правильного уровня целевых показателей зависит от хорошего понимания наличия возобновляемых источников энергии среди других ключевых факторов. Анализ целевых показателей, установленных на уровне города в отношении как местных возобновляемых источников энергии, так и возобновляемых электростанций, расположенных вблизи городов.

Городские солнечные фотоэлектрические системы, как правило, меньше по масштабу, чем наземные системы, расположенные на окраинах городов. Эти системы обычно устанавливаются

на крышах и фасадах зданий или интегрируются с ними. Расширение масштабов применения фотоэлектрических систем в городах сталкивается с уникальными проблемами, включая ограниченность земельных ресурсов, потенциальное влияние увеличения доли возобновляемых источников энергии в местной сети и недостаточное понимание экономических последствий солнечных фотоэлектрических систем для местных поставщиков электроэнергии и коммунальных служб.

Планирование городской энергетической системы, ориентированное конкретно на интеграцию возобновляемых источников энергии в энергетическую инфраструктуру, имеет важное значение для продвижения процесса преобразования мировой энергетики. Выбор правильного инструмента моделирования для этого планирования имеет решающее значение. В данном исследовании рассматривались широко используемые инструменты моделирования для поддержки планирования городских энергетических систем, а также ключевые проблемы при осуществлении такого планирования, особенно в развивающихся странах. К ним относятся проблемы с данными, связанные главным образом с доступностью и детализацией энергетических данных на уровне городов, охватывающих вопросы спроса и предложения.

Для реализации такого потенциала сегодня необходимы преобразующие действия. Это действие создаст новые возможности и позволит найти инновационные решения для решения городских энергетических проблем.

По мере того, как города стремятся разработать эффективные, благоприятные для климата и устойчивые стратегии энергетической инфраструктуры, а также перспективные планы действий и инвестиционные решения на будущее, им необходимо будет улучшить свои знания о местных возобновляемых источниках энергии и о различных применениях городских технологий использования возобновляемых источников энергии, а также участвовать в надлежащем планировании для сетевой энергетической инфраструктуры с использованием низкоуглеродного энергетического комплекса.

Целью данного исследования являлось прогнозирование с последующим моделированием фотоэлектрического потенциала на примере крыш зданий города Алматы с инием данных солнечного потенциала за 2019 год.

Задачами исследования являлись:

- сбор необходимых данных из открытых источников по изучаемому объекту;

- создание цифровой модели рельефа (ЦМР) изучаемого объекта с использованием программы ArcGIS Pro 2.8.3 на основе снимков LiDAR;

- сбор и анализ полученных данных с помощью инструмента определения зон солнечной радиации (Area Solar Radiation, Spatial Analysis tools);

- вычисление параметров занимаемой площади, определения склона и ориентации крыш согласно минимальным значениям;

- перерасчет полученных значений согласно поправочным коэффициентам и стандартным расчетным значениям;

Материалы и методы

Объект исследования: модель прогнозирования солнечного потенциала крыш зданий в городе Алматы.

Исходные данные: космоснимки модели LiDAR и полученные с OSM данные по имеющимся в городе Алматы зданиям.

Методы исследования: анализ при помощи инструментов пространственного анализа – определение солнечного потенциала, определение наклона и ориентации по сторонам горизонта в программе ArcGIS Pro. Инструмент по созданию слоя солнечного излучения в ArcGIS Pro имеет директиву по определению количества солнечной энергии, что достигает земной поверхности с учетом вариативного ряда высотных показателей, среди коих числятся и интересующие нас полигональные формы крыш зданий Поступающее солнечное излучение (инсоляция), получаемое от солнца, является основным источником энергии, который управляет многими физическими и биологическими процессами на Земле. Понимание его важности для ландшафтных масштабов является ключом к пониманию широкого спектра природных процессов и деятельности человека.

В ландшафтных масштабах топография является основным фактором, определяющим пространственную изменчивость инсоляции. Изменение высоты, ориентации (наклона и аспекта) и теней, отбрасываемых топографическими объектами, – все это влияет на величину инсоляции, получаемой в разных местах. Эта изменчивость также меняется в зависимости от времени суток и времени года и, в свою очередь, способствует изменчивости микроклимата, включая такие факторы, как температурный режим воздуха и почвы, испарение, характер таяния снега, влажность почвы и свет, доступный для фотосинтеза.

Инструменты анализа солнечной радиации в расширении ArcGIS Spatial Analyst позволя-

ют отображать и анализировать влияние солнца на географическую область за определенные периоды времени. Он учитывает атмосферные эффекты, широту и высоту местности, крутизну (наклон) и направление по компасу (аспект), ежедневные и сезонные изменения угла наклона солнца и влияние теней, отбрасываемых окружающей топографией. Полученные результаты могут быть легко интегрированы с другими данными ГИС и могут помочь моделировать физические и биологические процессы, на которые влияет солнце (ESRI (n.d.)).

Инструмент выявления наклона определяет крутизну в каждой ячейке растровой поверхности. Чем ниже значение уклона, тем более ровная местность; чем выше значение уклона, тем круче местность. Выходной растр наклона может быть рассчитан в двух типах единиц измерения, градусах или процентах (процентное увеличение). Процентное увеличение можно лучше понять, если рассматривать его как увеличение, деленное на пробег, умноженное на 100. Рассмотрим треугольник В ниже. Когда угол составляет 45 градусов, подъем равен пробегу, а процент подъема составляет 100 процентов. По мере приближения угла наклона к вертикали (90 градусов), как в треугольнике С, процентное увеличение начинает приближаться к бесконечности. Согласно концепции, инструмент определения склонов подбирает плоскость для высотных Z-значений из радиуса размером 3x3 вокруг обрабатываемой ячейки, являвшейся центральной при проведении анализа (ESRI (n.d.)). Инструмент экспозиции был ориентирован на установление направления уклона максимальной скорости изменения значений от каждой ячейки до соседних. Инструмент аспектирования определяет направление, в котором обращен склон вниз. Значения каждой ячейки выходного растра указывают направление компаса, в котором поверхность обращена в этом месте. Он измеряется по часовой стрелке в градусах от 0 (строго на север) до 360 (снова строго на север), проходя полный круг. Плоским участкам, не имеющим направления вниз, присваивается значение -1 (ESRI (n.d.)).

Результаты

Разработка методов оценки технического потенциала фотоэлектрических систем на крыше на уровне отдельных зданий является с собой обширный потенциал применения, т.к. предыдущие оценки на региональном и национальном уровнях не имели строгой основы в

геопространственных данных и статистическом анализе. Анализы, приведенные в исследовании, направлены на помощь в восполнении вышеупомянутых пробелов, предоставляя подробный анализ на основе данных о доступности фотоэлектрических систем на крышах зданий в Алматы и техническом потенциале производства электроэнергии. Данный анализ основывался на использовании данных обнаружения и определения дальности света (LiDAR), инструментах географической информационной системы (ГИС) и моделировании процессов генерации фотоэлектрических элементов для последующего расчета пригодности крыш для потенциального размещения фотоэлектрических элементов в Алматы. Анализ тенденций в пригодности крыш для размещения фотоэлектрических систем выявил важные изменения в этом ключевом факторе технического потенциала фотоэлектрических систем на крышах, которые не были учтены предыдущими подходами (Pieter Gagnon 2016, 3-5).

Точная характеристика потенциала солнечной энергии на крыше имеет решающее значение для содействия широкому распространению возобновляемых источников энергии в городах с высокой плотностью населения. Тем не менее, это была давняя проблема из-за сложных эффектов затенения зданий и разнообразных возможностей на крыше (Ren H. 2022, 1).

Таким образом, производство и потребление распределенной фотоэлектрической электроэнергии представляет большой интерес для большинства городов, и для облегчения этой задачи необходимы методологии и инструменты для оценки ее потенциала (Pedrero J. 2019, 3-4). В научном исследовании предлагался метод оценки фотоэлектрического потенциала, основанный на данных для города для создания 3D-карты ГИС, оценки доступной солнечной радиации и расчета производства солнечной фотоэлектрической электроэнергии.

Теоретический потенциал солнечной энергии определяется как общее количество годовой солнечной радиации в подходящих районах для применения солнечной энергии, что должно учитывать многочисленные ограничения на этапе оценки для достижения соответствующих областей. Технический потенциал определяется как сумма общего теоретического потенциала, который может быть преобразован в электроэнергию с использованием существующих технологий (Younes Noorollahi 2020, 3).

В настоящее время возобновляемые источники энергии и технологии солнечной энергети-

ки играют важную роль в обеспечении удовлетворения энергетических потребностей и борьбе с изменением климата во всем мире. Солнечная энергия на крыше быстро растет в городских районах и может помочь зданиям минимизировать выбросы углекислого газа, удовлетворить потребности в электроэнергии и достичь электроснабжения с минимальным загрязнением городской среды (Kalingga Titon Nur Ihsan 2021, 83-84).

Увеличение производства чистой и экологически чистой энергии стало одной из мировых повесток дня в качестве стратегического усилия по борьбе с долгосрочным изменением климата. Видя потенциал производимой энергии, простоту процесса установки и небольшой риск причинения вреда, солнечная энергия привлекла значительное внимание многих стран мира (Carl 2014, 93).

Структурно энергетический комплекс города Алматы осуществляет свою деятельность при снабжении ряда энергоисточников. В пределах границ города Алматы среди энергоисточников значатся ТЭЦ №1, 2 и 3, Каскад ГЭС и Капшагайская ГЭС, что в сумме выдают обеспечение города электроэнергией в 65%. Внешними источниками энергообеспечения города Алматы являются Экибастузская и Жамбылская ГРЭС, а также Мойнакская ГЭС, что в сумме обеспечивают энергетический комплекс пропорцией в оставшиеся 35%. Алматинская область, а с нею и город Алматы, является энергодефицитной и имеет прямую зависимость от передачи электроэнергии со стороны. Область способна к генерации порядка чуть более 6 млрд кВтч, учитывая что общее потребление области превышает 10 млрд кВтч, что в итоге дает отрицательный показатель баланса порядка 60%.

Казахстан обладает огромным потенциалом солнечной энергии. Количество солнечной радиации составляет 1300-1800 кВтч на квадратный метр в год. Годовой потенциал солнечной энергии оценивается в 2,5 миллиарда кВтч. Не менее 50% территории Казахстана пригодно для установки солнечных электростанций (Антонов 2014, 14).

Закон о поддержке возобновляемых источников энергии в Республике Казахстан был опубликован в 2009-ом году, но данный документ требовал определенных доработок, что были произведены в период с 2013-го по 2017-ый годы. Стартом внесения доработок в закон ознаменовывается создание расчетно-финансового центра (РФЦ) при АО «KEGOC», что является

в стране системным оператором. Данное новшество привело созданный расчетно-финансовый центр к позиции центрального закупщика электрической энергии, получаемой от возобновляемых источников энергии. Далее расчетно-финансовый центр ориентируется на подписание offtake-договоров с инвесторами по выкупу всего объема производимой электроэнергии в течение 15 лет (в 2020-ом году срок был увеличен до 20 лет). Также к вышеперечисленному добавляются преференции в виде освобождения от таможенных пошлин, от НДС при импорте и получении государственных натуральных грантов, внесенные в 2016-ом году (CaRNet (n.d.)). 2020-ый год к списку прежних преференций были добавлены освобождения от имущественного налога, земельного налога и корпоративного подоходного налога (КПН). Республика Казахстан находится в стартовой точке процесса развития возобновляемых источников энергии и согласно первому рубежу заявленных целей имеется результат – 3% доли возобновляемых источников энергии в общем объеме производства электроэнергии. Развитие рынка солнечной энергетики способно простимулировать вопросы энергодефицита в регионе и следственно стабилизировать формирование тарифов вне зависимости от формы лица-потребителя (Сим 2015, 4).

Южный регион Казахстана, часть коего является и город Алматы, имеет солидный потенциал для развития солнечной энергетики ввиду высокого показателя количества солнечных дней в календарном году в сравнении с другими регионами Республики Казахстан. Тренд на солнечную энергетику в сравнении с другими типами ВИЭ обусловлен рядом факторов, что коррелируют с основными фактами по обоснованию монтажа подобных установок. Из перечня преимуществ выделяются факторы относительной простоты строительства, низкого уровня затрат по логистическому аспекту и последующему обслуживанию.

Технический потенциал – это показатель, который количественно определяет генерацию, доступную с помощью конкретной технологии в данном регионе; он учитывает наличие и качество ресурсов, производительность технической системы и физическую доступность подходящей территории для развития. Оценка технического потенциала обеспечивает установленный ориентир для возобновляемой технологии.

На сегодняшний день имеется тенденция к коммерческой реализации солнечных панелей в городе Алматы. Данная тенденция имеет место быть, но ограничивается точечным исполне-

нием. Солнечные панели как часть экосистемы города способна реализовать процесс повышения качества экологической ситуации в городе, где имеется высокий уровень выброса твердых частиц от производственного сектора. Как пример стоит привести инновационный экологический объект, реализованный на основе солнечных панелей для энергообеспечения – мечеть Ырыскелди-кажы. Данный объект с нулевым энергопотреблением был реализован в городе Нур-Султан в 2018-ом году и базируется на своей территории солнечные панели, что установлены как в качестве отдельных объектов, также и как навесы для парковочной зоны и пешеходных зон. Данный проект является конструкцией, склонную к пассивному строению, где энергозатраты имеет минимальный показатель. Излишки направляются в «Астанаэнергосбыт», что позволяет данному учреждению иметь дополнительный доход для покрытия затрат зарплатного фонда. Пример подобного экологического объекта вписывается в экосистему города и таким образом позволяет выдвинуть предположение, что такого рода проекты могут быть реализованы и в городе Алматы, учитывая более высокий солнечный потенциал, обоснованный большим количеством солнечных дней.

Пространственное разнообразие городской среды является решающим фактором для установки фотоэлектрических систем. В дополнение к основным задачам крыш (формирование кроны здания, выдерживание нагрузки от ветра, дождя и снега, защита внутренней части здания, обеспечение тепловой защиты, звукоизоляции и противопожарной защиты), конструкция крыши в настоящее время выполняет расширенную вспомогательную функцию и принимает или интегрирует элементы преобразования энергии (ESRI (n.d.)).

Пространственный анализ может быть использован для выявления различных проблемных аспектов, ограничений и, в конечном счете, преимуществ установки фотоэлектрических систем на поверхностях крыши. Эти анализы используются, среди прочего, для обработки, визуализации и интерпретации разнообразных представлений объектов реального мира. Наклон, аспект и тень используются для определения топологических и геометрических свойств поверхностей крыши (Chow 2016, 1094-1095).

В дополнение к площади крыши и ее наклону и ориентации, а также вторичному затенению, в случае установки фотоэлектрических систем определяющим фактором также является несущая способность конструкции крыши (особенно

при установке большого количества панелей на конструкции крыши с большой площадью). В целом, все площади крыши подходят для использования солнечной энергии, если их площадь достаточна для экономически значимых установок фотоэлектрических систем (как правило, систем солнечных панелей). В случае изогнутых поверхностей различные углы наклона приводят к различным коэффициентам экспозиции вокруг точек компаса, которые необходимо учитывать при подключении фотоэлектрических панелей (Huld 2012, 1806-1807).

Входными данными для анализа являются лидарные данные и наборы данных о очертаниях зданий. Эти данные обрабатываются для определения затенения, наклона и азимута каждой крыши с горизонтальным разрешением 1 квадратный метр (Ntsoane 2017, 6-8). Затем применяется набор критериев, чтобы определить, какая площадь крыши подходит для развертывания фотоэлектрических систем. После эти результаты могут быть объединены для определения общего количества площади крыши, подходящей для фотоэлектрических систем на крышах зданий города Алматы.

Иницирующим оценку потенциала процессом является экспорт подходящих космоснимков, что впоследствии могут быть конвертированы в растровый файл с последующей настройкой цифровой модели местности (DSM – Digital Surface Model). DSM ориентирован на демонстрацию статистических показателей рельефа в процессе визуализации оных, что также включает в себя различного рода естественные неровности и объекты антропогенной деятельности. Как растровый слой DSM сводит данные к визуализации в сеточной форме, каждый пиксель (ячейка) которого несет в себе числовое значение, определяющее разницу в количественных показателях. После завершения процесса конвертации космоснимков в формат LAS (Laser), что предназначен для обмена и последующего архивирования данных облака лидарных точек, возникает необходимость в создании сопутствующей базы данных, а следом и конвертации в растровый формат. Цифровая модель, полученная в виде раstra, способна продемонстрировать наличие интересных нас объектов при помощи цветовой разницы, но при помощи инструмента отмывки в ArcGIS есть возможность улучшить качество визуализации вышеперечисленных предметов. Инструмент отмывки рельефа позволяет в нашем анализе придать реалистичного эффекта затенения для отображения высотных показателей (Šúri 2005, 57-59).



Рисунок 1. DSM-модель города Алматы, сформированная из набора данных LiDAR.

Инструмент отмывка как единица пространственного анализа является собой трехмерную модель местности в серой цветовой палитре при относительном положении солнца, что берется в учет при исполнении процессов затенения изображения. Функционал данного инструмента ориентируется на свойства высотных показателей и значений азимута, задавая тем самым финальное расположение источника света (Robert Margolis 2017, 5-7). Количественные значения высоты и азимута вкуче ориентировались на относительное расположение источника света, что были фундаментальными для последующего создания трехмерной модели местности (числовые значения отмывки или цветной отмывки). Показатель высотности и являлся углом превышения источника света над имеющимся горизонтом в диапазоне от нуля до девяноста градусов. Числовое значение нуля градусов указывало на позиционирование источника света на горизонте, что обозначало расположение на той же горизонтальной плоскости, что и территория привязки (Christine Lou A. Lazaga 2014, 4-5). Числовое значение в девяноста градусов равнялось расположению источника света прямо над местностью. Азимут как пространственный показатель отмывки являл собой относительное положение источника света вдоль горизонта и имел обозначение в градусах. Данное положение указывалось углом источника света, что измерялось по

часовой стрелке с севера, обозначавшего старт отсчета. Азимутальное значение в ноль градусов соответствовало северу, девяносто градусов – востоку, сто восемьдесят градусов – югу, а значение в двести семьдесят градусов – западу. Как результат отмывка рельефа местности динамически масштабировалась при помощи изменения коэффициента Z. Данный коэффициент Z являлся коэффициентом масштабирования, что был использован для последующей конвертации числовых данных высоты для 2 целей:

Конвертация значений высоты (в нашем случае в метрах) в единицы горизонтальных координат набора данных, что выражались в градусах

Добавление фактора вертикального преувеличения для создания визуального эффекта (ESRI (n.d.)).

Маской последующих наших анализов для вычисления солнечного потенциала будут являться контуры зданий города Алматы, что имеют полигональную форму и относятся к векторному слою. Благодаря контурам зданий анализ солнечного потенциала позволит выявить качественные характеристики по зоне распределения солнечных лучей в границах изучаемой нами территории. Алгоритм расчета основывается на определении количества солнечной энергии, что попадает на поверхность крыши здания. Исходя из этого следует, что тем выше количественный показатель ак-

кумуляции солнечной энергии на поверхности крыши, тем больше вероятность солнечного

потенциала для последующей установки солнечных батарей.

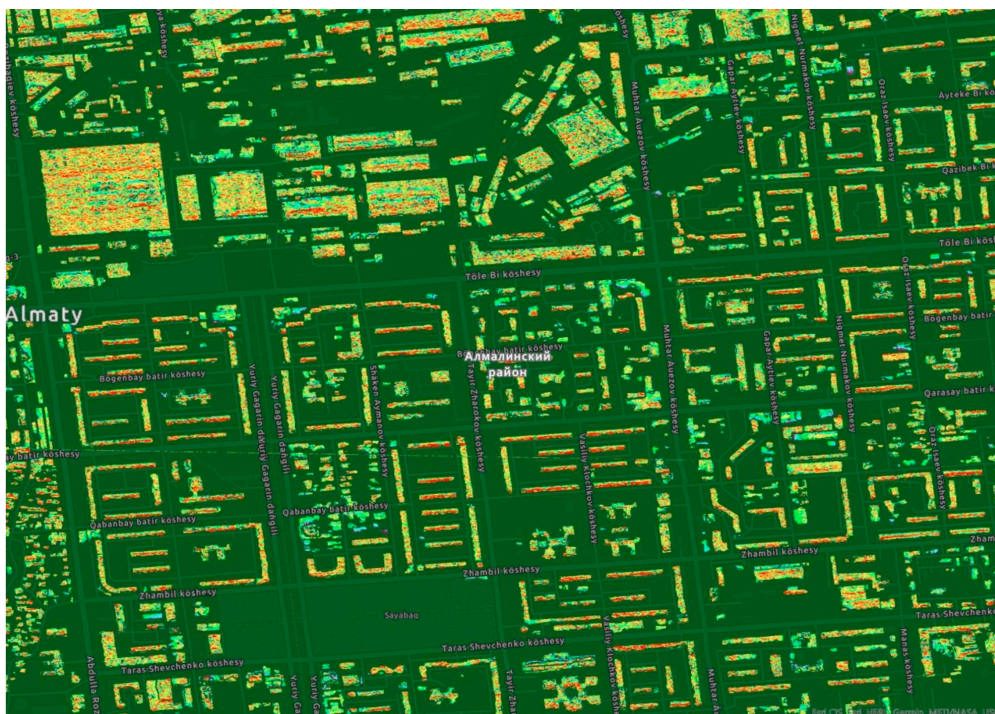


Рисунок 2. Определение склона зданий для выделения крыш с пологим уклоном.

Выходной растр радиации был представлен числовыми значениями с плавающей точкой и обозначался в ваттах на квадратный метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Растр продолжительности прямого излучения являлся значением целочисленным, а единицей измерения значений раstra являлись временные показатели, выразившиеся в часах. Широтные показатели изучаемой территории обозначались единицами измерения в виде десятичных градусов, значения коих являлись положительными для северного полушария и отрицательными для южного полушария. Модель земной поверхности с разрешением 30 метров представляла собой сглаженную поверхность, и исходя из этого в большинстве ситуаций является достаточным использование меньшего количества направлений, что и было сделано с применением числового значения, равного 16. Для цифровой модели рельефа с более высоким показателем разрешения, и в особенности, для тех случаев, когда в цифровой модели рельефа отражены искусственные структуры, количество направлений имеет смысл увеличить. Объективное увеличение количества направлений повышает точность, но при данном условии увеличивается

и временной период, затрачиваемый на исполнение операционных вычислений (Ana M. Martín 2015, 331-333).

После завершения анализа вычисления солнечного потенциала по крышам города Алматы стоит произвести перерасчет статистики, исходя из того, что стандартные значения не полностью отражают потенциала. В связи с этим необходим перерасчет из стандартных значений $\text{Вт}/\text{м}^2$ в киловатт-часы на квадратный метр ($\text{кВтч}/\text{м}^2$). Для данной цели необходимо воспользоваться инструментом «Калькулятор раstra», относящийся к инструментарию пространственного анализа. Один киловатт идентичен 1000 ватт и согласно синтаксису необходимо произвести процесс деления базовых значений на 1000. Полученный ранее растровый слой необходимо внести в выражение с последующим делением, что в итоге выведет к образованию нового слоя с приведенными значениями (Jin H. Jo 2015, 175-176).

По завершению процесса корреляции есть возможность перейти к этапу последующего определения наиболее подходящих под установку солнечных панелей крыш в городе. Для получения финального результата необходимо

учитывать ряд критериев, определяющих солнечный потенциал поверхностей. Первым является уровень уклона крыши, что в своем значении не должен быть менее 45 градусов, так как крутой угол имеет низкий солнечный потенциал. Вторым критерий основывается на получении определенного количества солнечного излучения, что должен быть согласно стандарту не ниже 800 кВтч/м² (Ваугаксі Воz 2015, 402-406). Третий, он же последний из критериев, основывается на направленности согласно имеющейся позиции и согласно северному полушарию, в котором находится город Алматы, крыши зданий не должны быть направлены на север, так как согласно ориентации крыши, направленные на север получают меньшее количество солнечного излучения.

Переходим к первому из критериев и обращаемся к инструментарию пространственного анализа, останавливая свой выбор на инструменте определения уклонов местности. Ячейки, вносимые при анализе инструментом определения уклона, были ориентированы на вычисление максимальной степени изменения в количественном значении Z между определенной ячейкой и соседними с ней ячейками (Лука 2014, 599-601). Максимальная степень изменения в числовых значениях высоты на единицу расстояния между определенной ячейкой и восемью соседними с ней ячейками определяла наиболее крутой спуск вниз по склону из идентифицированной ячейки. Числовое значение уклона изучаемой плоскости вычислялось с применением методики усредненного максимума. Направление плоских граней являлось экспозицией обрабатываемой ячейки. Чем ниже числовое значение уклона, тем более плоской являлась земная поверхность и в обратную сторону согласно тому же принципу – чем выше было значение уклона, тем более крутые склоны расположены на поверхности (Melius 2013, 15-18). При наличии на изучаемой местности ячейки с Z без числовых значений (NoData), данному местоположению присваивалось Z -значение центральной ячейки. На краю раstra, по крайней мере три ячейки (за пределами изучаемого раstra) в качестве Z -значения имели нулевое значение (NoData). Данным ячейкам присваивались Z -значения центральной ячейки. Как результат анализ основывался на уплощении плоскости размером 3x3, что подбирались для угловых ячеек, что согласно стандарту приводит к уменьшению уклонов. Как итог образованный растровый слой содержит в себе значения уклонов местности от 0 до 90 градусов. Чем ярче цвет

символьного значения, тем выше пологость уклона, что повышает шансы на размещение солнечных панелей на пологих уклонах крыш зданий в городе Алматы (Teves 2016, 14-15).

Следом за анализом уклонов следует перейти к критерию ориентации крыш зданий и в данном аспекте мы обращаемся к созданию слоя экспозиции, также относящегося к инструментам пространственного анализа. Данное направление рассматривалось как направление уклона. Значения всех ячеек выходного раstra указывали направление по компасу, с которым сталкивается поверхность в изучаемом местоположении (Yibo Chen 2017, 206-208). Направление измерялось по часовой стрелке в градусах от 0 до 360, формируя полный круг. Плоские области, что не имели направления вниз по склону, получали значение -1. В своей сущности инструмент экспозиции подбирает плоскость для Z -значений из окрестности размером 3x3 вокруг обрабатываемой или центральной ячейки. Направление плоских граней являлось экспозицией обрабатываемой ячейки. Результатом определялся растровый слой со значениями, что выражали ориентацию в градусах, где значение «0» определялось как север, а значение «360» относилось к югу. Для более подробного изучения ориентации крыш имеется возможность обращения к легенде слоя, в котором детально расписаны диапазоны по градусам в каждом направлении.

После исполнения анализов определения уклона и ориентации необходимо перейти к процессу фильтрации согласно значениям, что не подходят под потенциальное размещение фотоэлектрических систем (Michael O. Dioha 2018, 711-713). Первым под процессом фильтрации стоит подвести области, уклон коих равен или меньше 45 градусов. Для данной цели мы обращаемся к инструменту создания условий, являющегося частью инструментария пространственного анализа. При работе с инструментом создания условий необходимо прописать выражение, что будет истиной при создании нового растрового слоя. Согласно выражению мы выбираем значение «равно или менее 45 градусов», что в итоге определяет истинные и ложные ячейки согласно заданному числовому значению. Результатом данной выборки является удаление областей с низким уклоном, что не соответствовали установленному выражению.

Следующим в процессе фильтрации согласно стандарту является этап определения рентабельности реализации фотоэлектрических систем на крышах зданий Алматы и согласно данному эта-

пу солнечное излучение должно иметь значение не ниже 800 кВтч/м^2 . Инструмент создания условий вновь являет себя нашим услугам и мы начинаем прописывать выражение, что имеет значение «равно или более 800 кВтч/м^2 ». Итогом данного анализа станет новый растровый слой, исключающий значения получения солнечного излучения не ниже 800 кВтч/м^2 .

Третий из критериев, о которых мы говорили выше, основывается на ориентации на север, и в нашем процессе фильтрации мы должны исключить подобные значения для определения солнечного потенциала. Ранее при проведении фильтрации получаемой солнечной радиации многие из данных элементов более не отображаются, так как не соответствуют заданному выражению. Северные уклоны согласно нормативам пространственного анализа имеют значение менее $22,5$ и более $337,5$ градусов согласно ориентации на изучаемой местности (Samuel Asumadu-Sarkodie 2016, 676-678). Для данной фильтрации необходимо вновь обратиться к определению уклонов и задать новое выражение как вспомогательную функцию для последующих манипуляций с ориентацией. Уклон местности выбирается со значением «равно или менее 10 градусов», что впоследствии даст отражение

при последующем определении условий местности. При фильтрации слоя ориентации необходимо включить вышеуказанный слой уклона со значением «равно или менее 10 градусов» в качестве ложного растра для последующего определения ложных ячеек, направленных на север, что будут заменены значениями с низким уклоном.

По завершению процессов фильтрации мы переходим к необходимости провести расчет по количеству среднего значения солнечной радиации на каждое здание в городе Алматы. Для данных целей нам необходимо обратиться к инструменту перевода зональной статистики в табличный вид, что является инструментом пространственного анализа. В качестве входных векторных и растровых данных подбирается слой отрисованных полигонов с указанием идентификатора здания. Итогом данного анализа станет таблица, содержащая в себе данные площади в квадратных метрах и средней солнечной радиации в кВтч/м^2 для каждой крыши зданий в городе Алматы. Полученной таблице необходимо создать связь с пространственной информацией и в рамках данной цели организовывается соединение с полигональным слоем контуров зданий с учетом указанных идентификаторов.

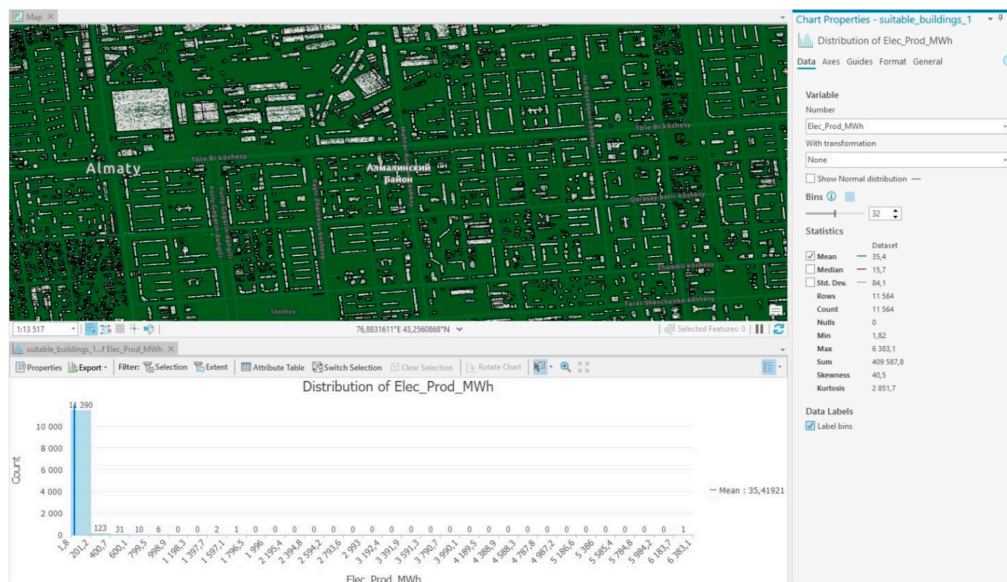


Рисунок 3. Статистический вывод количества вырабатываемой энергии на примере Алмалинского района города Алматы.

Финальным этапом определения подходящих под установление фотоэлектрических систем крыш необходимо разобраться с площадью зданий, так как для размещения солнечных па-

нелей необходимо иметь понимание объема размещаемой инфраструктуры. Значение площади подходит под установление вышеуказанных систем в случае, если значение превышает 30

квадратных метров согласно стандартам размещения. Согласно данному параметру мы переходим к функции выборки согласно атрибутам, где устанавливаем выражение площади «равно или более 30 квадратных метров».

После завершения подбора согласно имеющейся площади мы переходим к вычислению количества солнечного излучения, получаемого в течение календарного года. Данный процесс возможен при перемножении параметров полезной площади на среднее годовое излучение и для данной цели необходимо преобразовать солнечное излучение из параметра «киловатт-часы на квадратный метр» в параметр «мегаватт-часы на квадратный метр» во избежание больших чисел. Процесс осуществляется при обращении к таблице атрибутов подходящих зданий для создания нового поля, что перемножает параметры площади подходящей поверхности на среднее солнечное излучения с последующим разделением на 1000 (кВтч/м² переводится в МВтч/м²).

Переходя к вопросу преобразования солнечной радиации в энергию необходимо оценить потенциал производства электроэнергии. Полученные нами результаты не являют полную картину, так как должны учитываться определенные характеристики, связанные с эффективностью и производительностью солнечных панелей (К. I. Jin H. Jo 2017, 55-56). Количество получаемой солнечной энергии зависит помимо солнечной радиации еще и от показателей эффективности солнечных батарей и аспекта, связанного с соотношением производительности планируемой установки. Среднее значение согласно стандартам по эффективности приводится в значение 15 процентов и по производительности в значение 86 процентов. Это значит что солнечные панели, устанавливаемые на крышах зданий, способны производить процесс преобразования 15 процентов получаемой солнечной энергии в электричество, тогда как 86 процентов из преобразованного имеет свойство поддерживаться в период использования фотоэлектрических систем. Создается новое поле в таблице атрибутов, при вычислении потенциальной вырабатываемой энергии которой необходимо перемножить количество солнечного излучения в течение календарного года на указанные проценты, что ретранслируются в коэффициенты для понимания машины.

Выводы

Итоговым показателем приведенной статистики стоит считать чуть более 400 млн кВтч в год на примере Алмалинского района города Алматы, что может считаться существенным сдвигом при движении навстречу зеленой энергетике и исходя из идей реализации концепции нулевых выбросов при обеспечении электроэнергией городских пространств, что включается в основы продвижения идей Smart City.

Алматы согласно географическому расположению имеет определенную расположенность к восприимчивости от продукции производственных комплексов, что имеют в основе потребления примитивные материалы, способные ухудшить качество жизни в стремительном развивающемся мегаполисе. Исходя из вышеизложенной информации можно сослаться и на проектируемые концепции перевода тепловых электрических станций на газ с возведением паровых установок, но данные проекты также нуждаются во времени для превращения в жизнь. Несмотря на то, что реализация кажется возможной лишь в теории, имеется прямая необходимость во внедрении подобных технологий, так как это может обеспечить различного рода небюджетные организации финансовой помощью, что будет выражаться в отсутствии необходимости в потреблении стандартной электроэнергии за счет наличия собственного источника, а также позволит формировать бюджет при помощи создания экономической деятельности на основе продажи излишков электроэнергии, что в перспективе существенно может снизить финансовую нагрузку на местные исполнительные органы.

Как итог общего анализа мы можем обратиться к таблице атрибутов подходящих под установку фотоэлектрических систем крыш и при помощи инструмента статистики вычислить общий потенциал производства, что в перспективе может покрыть нужды города Алматы или же в крайнем случае диверсифицировать типы производства электроэнергии с последующим уменьшением участия ТЭЦ-2 в энергообеспечении города, что в свою очередь эффектом домино способно решить ряд многих проблем, одной из которых является экологическая обстановка, напрямую определяющая здоровье граждан города Алматы.

Литература

- Ana M. Martín, Javier Domínguez, Julio Amador. "Applying LIDAR datasets and GIS based model to evaluate solar potential over roofs: a review." *AIMS Energy, Volume 3, Issue 3*, Август 13, 2015: 331-333.
- Bayrakci Boz, M., Calvert, K., & R. S. Brownson, J. "An automated model for rooftop PV systems assessment in ArcGIS using LIDAR." *AIMS Energy, Volume 3, Issue 3*, Август 27, 2015: 402-406.
- Carl C. «Calculating Solar Photovoltaic Potential on Residential Rooftops In Kailua, Hawaii.» 2014: 93.
- CaRNet. Энергетика и возобновляемые источники энергии в Казахстане. Региональный экологический центр Центральной Азии. Алматы, (n.d.).
- Chow, A., Li, S. and Fung, A.S. "Modeling urban solar energy with high spatiotemporal resolution: A case study in Toronto, Canada." *International Journal of Green Energy, Volume 13*, 2016: 1094-1095.
- Christine Lou A. Lazaga, Joseph E. Acosta. "GIS-based rooftop site mapping for solar photovoltaic system installation using LiDAR-derived DSM." *ASIAN ASSOCIATION ON REMOTE SENSING*, 2014: 4-5.
- ESRI. *Area Solar Radiation [Электронный ресурс]*. (n.d.). <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/area-solar-radiation.htm>.
- Estimate solar power potential [Электронный ресурс]*. (n.d.). <https://learn.arcgis.com/ru/projects/estimate-solar-power-potential/hillshade-function> [Электронный ресурс]. (n.d.). <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/hillshade-function.htm>.
- How Aspect works [Электронный ресурс]*. (n.d.). <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm>.
- How Slope works [Электронный ресурс]*. (n.d.). <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>.
- Huld, T., Müller, R. and Gambardella, A. "A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa." *SOLAR ENERGY 86 (6)*, 2012: 1806-1807.
- Jin H. Jo, Kadi Ilves, Tyler Barth, Ellen Leszczynski. "Implementation of a large-scale solar photovoltaic system at a higher education institution in Illinois, USA." *AIMS Energy, Volume 5, Issue 1*, 3 Январь, 2017: 55-56.
- Jin H. Jo, Zachary Rose, Jamie Cross, Evan Daebel, Andrew Verderber, John C. Kostelnick. "Application of Airborne LiDAR Data and Geographic Information Systems (GIS) to Develop a Distributed Generation System for the Town of Normal, IL." *AIMS Energy, Volume 3, Issue 2*, Март 31, 2015: 175-176.
- Kalingga Titon Nur Ihsan, Anjar Dimara Sakti, Ketut Wikantika. «Geospatial assessment for planning a smart energy city using rooftop solar photovoltaic in Bandung city, Indonesia.» *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIV-M-3-2021*, 2021: 83-84.
- Luka, N., Seme, S., Zlaus, D., Stumberger, G., & Zalik, B. "Buildings roofs photovoltaic potential assessment based on LiDAR (Light Detection And Ranging) data." *Elsevier, Energy (ENERGY), Volume 66*, Март 1, 2014: 599-601.
- Melius, J., Margolis, R., & Ong, S. *Estimating Rooftop Suitability for PV: A Review of Methods, Patents, and Validation Techniques*. 15-18, Oak Ridge: U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, 2013.
- Michael O. Dioha, Atul Kumar. "Rooftop solar PV for urban residential buildings of Nigeria: A preliminary attempt towards potential estimation." *AIMS Energy, Volume 6, Issue 5*, Январь 2018: 711-713.
- Ntsoane, M. "Rooftop Solar PV Potential Assessment in the City of Johannesburg." *Stellenbosch University*, 2017: 6-8.
- Pedrero J., Hermoso N., Hernández P., Muñoz I., Arribabalaga E., Mabe L., Prieto I., Izkara J.L. «IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 323. IOP Publishing, 12066.» *Assessment of urban-scale potential for solar PV generation and consumption*. 2019. 3-4.
- Pieter Gagnon, Robert Margolis, Jennifer Melius, Caleb Phillips, and Ryan Elmore. *Rooftop Solar Photovoltaic Technical Potential in the United States: A Detailed Assessment*. Denver: National Renewable Energy Laboratory, 2016.
- Ren H., Xu C., Ma Z., Sun Y. "A novel 3D-geographic information system and deep learning integrated approach for high-accuracy building rooftop solar energy potential characterization of high-density cities." *Elsevier Ltd.*, January 15, 2022: 1.
- Robert Margolis, Pieter Gagnon, Jennifer Melius, Caleb Phillips and Ryan Elmore. "Using GIS-based methods and lidar data to estimate rooftop solar technical potential in US cities." *Environmental Research Letters, Volume 12, Number 7*, 2017: 5-7.
- Samuel Asumadu-Sarkodie, Phebe Asantewaa Owusu. "A review of Ghana's solar energy potential." *AIMS Energy, Volume 4, Issue 5*, Сентябрь 6, 2016: 676-678.
- Šúri, M., Huld, T.A. and Dunlop, E.D. "PV-GIS: A web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe." *International Journal of Sustainable Energy, Volume 24, Issue 2*, 2005: 57-59.
- Teves, J., Sola, E.F., Pintor, B. H., & Ang, M. R. C. "Assessing the urban solar energy resource potential of Davao City, Philippines, using LiDAR Digital Surface Model (DSM) and GRASS GIS." *Proc. SPIE 10008, Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments, 1000809*, Октябрь 26, 2016: 14-15.
- Yibo Chen, Hongwei Tan, Simeng Li, Xiaodong Song. "GIS-based Dimensionless Assessment of Distributed Rooftop PV in Chinese Residential Communities." *Elsevier, Procedia Engineering, Volume 205*, 2017: 206-208.
- Younes Noorollahi, Mohammad Mohammadi, Hossein Yousefi, Amjad Anvari-Moghaddam A. "Spatial-Based Integration Model for Regional Scale Solar Energy Technical Potential." *MDPI Sustainability*, 2020: 3.
- Антонов. Зеленая энергетика Казахстана в 21 веке: мифы, реальность и перспективы. Алматы, 2014.
- Сим О. Новая индустриализация как драйвер экономического роста в Казахстане в условиях глобализации, 2015.

References

- Ana M. Martín, Javier Domínguez, Julio Amador. "Applying LIDAR datasets and GIS based model to evaluate solar potential over roofs: a review." *AIMS Energy, Volume 3, Issue 3*, August 13, 2015: 331-333.
- Bayrakci Boz, M., Calvert, K., & R. S. Brownson, J. "An automated model for rooftop PV systems assessment in ArcGIS using LIDAR." *AIMS Energy, Volume 3, Issue 3*, August 27, 2015: 402-406.
- Carl C. «Calculating Solar Photovoltaic Potential on Residential Rooftops In Kailua, Hawaii.» 2014: 93.
- CaRNet, Jenergetika i vozobnovljaemye istochniki jenergetiki v Kazahstane. Regional'nyj jekologicheskij centr Central'noj Azii [Energy and renewable energy sources in Kazakhstan. Regional Environmental Center of Central Asia] , Almaty (n.d.).
- Chow, A., Li, S. and Fung, A.S. "Modeling urban solar energy with high spatiotemporal resolution: A case study in Toronto, Canada." *International Journal of Green Energy, Volume 13*, 2016: 1094-1095.
- Christine Lou A. Lazaga, Joseph E. Acosta. "GIS-based rooftop site mapping for solar photovoltaic system installation using LiDAR-derived DSM." *ASIAN ASSOCIATION ON REMOTE SENSING*, 2014: 4-5.
- ESRI. *Area Solar Radiation [Electronic resource]*. (n.d.). <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/area-solar-radiation.htm>.
- Estimate solar power potential [Electronic resource]*. (n.d.). <https://learn.arcgis.com/ru/projects/estimate-solar-power-potential/>.
- Hillshade function [Electronic resource]*. (n.d.). <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/hillshade-function.htm>.
- How Aspect works [Electronic resource]*. (n.d.). <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm>.
- How Slope works [Electronic resource]*. (n.d.). <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>.
- Huld, T., Müller, R. and Gambardella, A. "A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa." *SOLAR ENERGY 86 (6)*, 2012: 1806-1807.
- Jin H. Jo, Kadi Ilves, Tyler Barth, Ellen Leszczynski. "Implementation of a large-scale solar photovoltaic system at a higher education institution in Illinois, USA." *AIMS Energy, Volume 5, Issue 1*, 3 January, 2017: 55-56.
- Jin H. Jo, Zachary Rose, Jamie Cross, Evan Daebel, Andrew Verderber, John C. Kostelnick. "Application of Airborne LiDAR Data and Geographic Information Systems (GIS) to Develop a Distributed Generation System for the Town of Normal, IL." *AIMS Energy, Volume 3, Issue 2*, March 31, 2015: 175-176.
- Kalingga Titon Nur Ihsan, Anjar Dimara Sakti, Ketut Wikantika. «Geospatial assessment for planning a smart energy city using rooftop solar photovoltaic in Bandung city, Indonesia.» *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIV-M-3-2021*, 2021: 83-84.
- Luka, N., Seme, S., Zlaus, D., Stumberger, G., & Zalik, B. "Buildings roofs photovoltaic potential assessment based on LiDAR (Light Detection And Ranging) data." *Elsevier, Energy (ENERGY), Volume 66*, March 1, 2014: 599-601.
- Melius, J., Margolis, R., & Ong, S. *Estimating Rooftop Suitability for PV : A Review of Methods, Patents , and Validation Techniques*. 15-18, Oak Ridge: U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, 2013.
- Michael O. Dioha, Atul Kumar. "Rooftop solar PV for urban residential buildings of Nigeria: A preliminary attempt towards potential estimation." *AIMS Energy, Volume 6, Issue 5*, January 2018: 711-713.
- Ntsoane, M. "Rooftop Solar PV Potential Assessment in the City of Johannesburg." *Stellenbosch University*, 2017: 6-8.
- Pedrero J., Hermoso N., Hernández P., Muñoz I., Arrizabalaga E., Mabe L., Prieto I., Izgara J.L. «IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 323. IOP Publishing, 12066.» *Assessment of urban-scale potential for solar PV generation and consumption*. 2019. 3-4.
- Pieter Gagnon, Robert Margolis, Jennifer Melius, Caleb Phillips, and Ryan Elmore. *Rooftop Solar Photovoltaic Technical Potential in the United States: A Detailed Assessment*. Denver: National Renewable Energy Laboratory, 2016.
- Ren H., Xu C., Ma Z., Sun Y. "A novel 3D-geographic information system and deep learning integrated approach for high-accuracy building rooftop solar energy potential characterization of high-density cities." *Elsevier Ltd.*, January 15, 2022: 1.
- Robert Margolis, Pieter Gagnon, Jennifer Melius, Caleb Phillips and Ryan Elmore. "Using GIS-based methods and lidar data to estimate rooftop solar technical potential in US cities." *Environmental Research Letters, Volume 12, Number 7*, 2017: 5-7.
- Samuel Asumadu-Sarkodie, Phebe Asantewaa Owusu. "A review of Ghana's solar energy potential." *AIMS Energy, Volume 4, Issue 5*, September 6, 2016: 676-678.
- Šúri, M., Huld, T.A. and Dunlop, E.D. "PV-GIS: A web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe." *International Journal of Sustainable Energy, Volume 24, Issue 2*, 2005: 57-59.
- Teves, J., Sola, E.F., Pintor, B. H., & Ang, M. R. C. "Assessing the urban solar energy resource potential of Davao City, Philippines, using LiDAR Digital Surface Model (DSM) and GRASS GIS." *Proc. SPIE 10008, Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments, 1000809*, October 26, 2016: 14-15.
- Yibo Chen, Hongwei Tan, Simeng Li, Xiaodong Song. "GIS-based Dimensionless Assessment of Distributed Rooftop PV in Chinese Residential Communities." *Elsevier, Procedia Engineering, Volume 205*, 2017: 206-208.
- Younes Noorollahi, Mohammad Mohammadi, Hossein Yousefi, Amjad Anvari-Moghaddam A. "Spatial-Based Integration Model for Regional Scale Solar Energy Technical Potential." *MDPI Sustainability*, 2020: 3.
- Antonov O. Zelenaja jenergetika Kazahstana v 21 veke: mify, real'nost' i perspektivy [Green energy of Kazakhstan in the 21st century: myths, reality and prospects], Almaty, 2014.
- Sim O. Novaja industrializacija kak drajver jekonomicheskogo rosta v Kazahstane v uslovijah globalizacii [New industrialization as a driver of economic growth in Kazakhstan in the context of globalization], 2015.