

www.jpis.az

13 (1)  
2022

## Оценка влияния на продуктивность сельскохозяйственных культур их сочетания с солнечными концентраторами

Татьяна Н. Байдык<sup>1</sup>, Масума Г. Мамедова<sup>2</sup>, Эрнст М. Куссуль<sup>3</sup>,  
Грасиела Веласко Эррера<sup>4</sup>, Айрам Куртидор<sup>5</sup>

<sup>1,3,4,5</sup>Институт прикладных наук и технологии, Национальный Автономный Университет Мексики,  
Сиркуито Экстериор, Сиудад Университария, Мехико, 04510, Мексика

<sup>2</sup>Национальная Академия Наук Азербайджана, Институт Информационных Технологий, ул. Б.Вахабзаде, 9А, AZ1141, Баку, Азербайджан

<sup>1</sup>[t.baydyk@icat.unam.mx](mailto:t.baydyk@icat.unam.mx); <sup>2</sup>[mmg51@mail.ru](mailto:mmg51@mail.ru); <sup>3</sup>[ernst.kussul@icat.unam.mx](mailto:ernst.kussul@icat.unam.mx); <sup>4</sup>[graciela.velasco@icat.unam.mx](mailto:graciela.velasco@icat.unam.mx); <sup>5</sup>[vero\\_cl83@hotmail.com](mailto:vero_cl83@hotmail.com)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

<http://doi.org/10.25045/jpis.v13.i1.02>

История статьи:

Поступила 10 сентября 2021

После доработки 15 ноября 2021

Принята 18 января 2022

### Ключевые слова:

Зеленая экономика  
Солнечные концентраторы  
Агроэкосистема  
Сельскохозяйственные культуры  
Модель оценки продуктивности растений.

*Assessment of the impact on crop productivity of their combination with solar concentrators*

### Keywords:

Green economy  
Solar concentrators  
Agroecosystem  
Agricultural crops  
Plant productivity assessment model.

*Bitkilərin günəş konsentrаторları ilə birləşməsinin onların məhsuldarlığına təsirinin qiymətləndirilməsi*

### Açar sözlər:

Yaşıl iqtisadiyyat  
Günəş konsentrаторları  
Aqroekosistem  
Bitkilər  
Bitki məhsuldarlığının qiymətləndirilməsi modeli

### АННОТАЦИЯ

В исследовании выделены основные факторы, определившие необходимость повсеместного развития зеленой экономики и роста потребностей в применении возобновляемых источников энергии. Рассмотрена возможность применения устройств зеленой энергетики в агрокомплексах и предложена модель для оценки влияния использования солнечных концентраторов совместно с сельскохозяйственными культурами на продуктивность последних. Сравнение проведено для двух стран – Азербайджана и Мексики, в экономике которых нефтяная промышленность является ведущей отраслью. Показано, что рельеф и климат обеих стран имеют много общих черт, выраженных, в частности, в обилии солнечного излучения, преобладании горных районов с удаленными и труднодоступными населенными пунктами, которые нуждаются в создании автономных систем жизнеобеспечения. Дан анализ проблемы совмещения солнечной энергетики и сельского хозяйства, приведены примеры успешных экспериментов в этой сфере, предложены целевые функции для установления взаимосвязи между параметрами сельскохозяйственных полей и характеристиками концентраторов.

The main factors determining the need for the widespread development of the green economy and the growing need for the use of renewable energy sources are identified. The article highlights the possibility of using green energy devices in agricultural complexes and proposes a model for assessing the impact of using solar concentrators together with the agricultural crops on the productivity of the latter. The comparison is made for two countries – Azerbaijan and Mexico, in which economy the oil industry is leading. It is shown that the relief and climate of both countries have many common features, particularly expressed in the abundance of solar radiation, the predominance of mountainous regions with remote and hard-to-reach settlements that need to create autonomous life support systems. The problem of combining solar energy and agriculture is analyzed, examples of successful experiments in this area are given, objective functions and models are proposed to establish the relationship between the parameters of agricultural fields and the characteristics of concentrators.

Yaşıl iqtisadiyyatın hərtərəfli inkişafını və bərpa olunan enerji mənbələrindən istifadəyə tələbatın artmasını şərtləndirən əsas amillər müəyyənləşdirilmişdir. Məqalədə aqrokomplekslərdə yaşıl enerji qurğularından istifadə olunması imkanlarına baxılmış və bitkilərin günəş konsentrаторları ilə birləşməsinin onların məhsuldarlığına təsirinin qiymətləndirilməsi üçün model təklif edilmişdir. İqtisadiyyatın əsas sahəsini neft sənayesi təşkil edən iki ölkə – Azərbaycan və Meksika üzrə müqayisə aparılmışdır. Göstərilmişdir ki, hər iki ölkənin relyefi və iqlimi bir çox ümumi cəhətlərə malikdir və bu, günəş radiasiyasının bolluğu, avtonom həyat təminatı sisteminin yaradılmasına ehtiyacı olan ucqar və çətin əlçatan yaşayış məntəqələrinə malik dağlıq rayonların üstünlük təşkil etməsində özünü xüsusilə əks etdirir. Günəş enerjisi ilə kənd təsərrüfatının birləşdirilməsi probleminin analizi verilmiş, bu sahədə uğurlu təcrübə nümunələri göstərilmiş, kənd təsərrüfatı sahələrinin parametrləri ilə konsentrаторların xarakteristikaları arasında qarşılıqlı əlaqənin qurulması üçün məqsəd funksiyası və modelləri təklif olunmuşdur.

## 1. Введение

В настоящее время человечество с особой остротой ощутило, что неконтролируемое производство и использование традиционной энергии, выбросы которых составляют 75% всех парниковых газов, загрязняющих атмосферу, неумолимо ведут мир к катастрофе. Неслучайно вопросы сдерживания глобального изменения климата и окружающей среды, развития «зеленой экономики» и экологически чистой энергетики, обеспечения каждого жителя планеты доступом к чистой энергии были предметом обсуждения на ежегодных общих дебатах 76-ой сессии Генеральной Ассамблеи ООН с участием глав государств и правительств 193 стран-членов этой организации, состоявшейся 21-27 сентября 2021 года в Нью-Йорке. В выступлениях представителей различных стран была подчеркнута озабоченность сложившейся ситуацией и озвучены конкретные обязательства по сокращению в ближайшие десять лет доли углеводородов, «декарбонизации» энергетической отрасли для выполнения Парижского соглашения по климату, являющегося юридическим международным договором об изменении климата [1]. Цель Парижского соглашения заключается в удержании глобального потепления в пределах 1,5°С по сравнению с доиндустриальным уровнем за счет сокращения выбросов парниковых газов, увеличения источников производства возобновляемой энергии, сотрудничества различных стран в борьбе с последствиями изменения климата.

Для реализации поставленных задач уже имеются технологические решения, позволяющие модернизировать системы энергоснабжения благодаря внедрению нового оборудования и использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Солнечные фотоэлектрические станции на сегодня являются основой разработки малозатратных и экологически чистых систем электропитания с использованием солнечной энергии во многих странах. Одной из перспективных и приоритетных сфер приложения солнечной энергетики становится сельское хозяйство, поскольку именно эта сфера деятельности является ведущей в обеспечении продовольственной безопасности той или иной страны. Поэтому идея интеграции солнечных устройств в агроэкосистемы – агровольтаика (Agrovoltaic) сегодня находится в центре внимания исследователей по всему миру. Различные подходы и предложения в этой сфере, направленные на

развитие как сельского хозяйства, так и солнечных устройств, нашли отражение в работах ученых из таких стран как США, Италия, Испания, Мексика, Индия и др. [2-6].

В проведенных исследованиях рассматриваются три принципа включения солнечных устройств в агроэкосистемы: 1) ориентация на сельскохозяйственные культуры, составляющие агроэкосистему; 2) ориентация на производство солнечной энергии; 3) ориентация на интеграцию солнечных батарей в агроэкосистемы. В первом случае задача заключается в максимальном увеличении производства биомассы за счет минимизации изменений в производственных системах. Устройства для производства электроэнергии размещаются на существующих полях и кардинально не меняют сельскохозяйственное производство. В рамках второго подхода разработчики пытаются максимизировать выработку солнечной энергии и минимизировать изменения в стандартных технологиях при получении солнечной энергии, способствуя развитию сельского хозяйства вокруг объектов возобновляемой энергии. Третий случай сводится к попытке объединить оба случая и получить преимущества за счет увеличения биомассы и энергетической мощности солнечных устройств.

Настоящее исследование проведено в рамках третьего подхода, предполагающего проведение такого совместного размещения солнечных устройств и сельскохозяйственных культур, которое минимизировало бы взаимное влияние между ними.

## 2. Азербайджан и Мексика: факторы, обуславливающие развитие зеленой экономики

К основным факторам, определяющим необходимость развития зеленой экономики в Азербайджане и Мексике, относятся имеющиеся в наличии традиционные и альтернативные энергетические ресурсы, глобальные тренды по охране окружающей среды, географическое положение, рельеф и климатические условия, основные приоритеты политики социально-экономического развития.

Сравнительный анализ Азербайджана и Мексики через призму факторов, определяющих актуальность освоения новых видов возобновляемой энергии, позволил выделить ряд схожих особенностей этих стран, которые выражены в следующем:

1. Нефтяная промышленность является ведущей отраслью экономики, а добыча и экспорт нефти – важнейший источник валютных поступлений и фактор роста благосостояния населения. Однако, как отмечено выше, добыча и переработка традиционных энергетических ресурсов связаны с экологическими проблемами и считаются одними из причин загрязнения окружающей среды и глобального изменения климата.

Выработка электроэнергии в Азербайджане и Мексике в основном базируется на углеводородные ресурсы. Обе страны традиционно в большей мере опираются на нефтяные электростанции, чем на газовые – с более экологически чистым сгоранием природного газа. В Азербайджане по данным на 2018 год установленная мощность нетто электростанций составляла 7829 МВт, в том числе на долю тепловых электростанций, сжигающих органическое топливо (ТЭС), приходилось 84,3 %, на возобновляемые источники энергии (ВИЭ) - 15,7 % [7]. По состоянию на 2020 год доля производства электроэнергии из экологически чистых источников в общем объеме производимой в стране энергии составила 17%. К 2030 году планируется довести этот показатель до 30%. Азербайджан ратифицировал Парижское соглашение по климату, добровольно взяв на себя обязательство по снижению до 2030 года уровня эмиссий газов, создающих тепловой эффект, на 35% по сравнению с базовым 1990 годом. В рамках соглашения по климату изучаются возможности страны по определению условных целей на 2050 год [8].

Согласно статистике 2018 года в Мексике установленная мощность нетто электростанций составляла 76921 МВт, из которых 70,7 % пришлось на долю ТЭС, сжигающих органическое топливо, 2,1 % составила доля атомных электростанций, а 27,2 % - ВИЭ [9]. По состоянию на 2020 год на долю производства электроэнергии из экологически чистых источников приходилось 27,8% от общего объема электроэнергии, производимой в Мексике. В рамках Парижского соглашения по климату Мексика приняла обязательство довести к 2024 году производство электроэнергии из экологически чистых источников до 35%, к 2035 году достичь доли в производстве электроэнергии с нулевым или низким уровнем выбросов до 40%. В долгосрочной перспективе планируется продолжить наращивание мощностей в секторе энергетики до 50% процентов к 2050 году, включая как возобновляемые источники энергии, так и ядерное и ископаемое топливо с низким содержанием углерода [5,10].

2. Территориям стран свойственно многообразие рельефа.

Рельеф Азербайджана охватывает горы, предгорья, низменности, равнины, ущелья. При этом около 60% площади страны занимают гористые территории [11]. Географическое положение и сложность рельефа определяют существующее стране малоземелье [12]. Ситуация усугубилась нахождением 20% территорий Азербайджана на протяжении почти 30-летнего периода под оккупацией. Экоцид в результате сжигания земель и лесных массивов, уничтожения флоры и фауны, повсеместного загрязнения освобожденных территорий минами, изменения русел рек, отравления водных ресурсов и другие незаконные действия привели к деградации плодородных земель в Карабахе и Восточном Зангезуре [13].

Рельеф Мексики составляют высокие горные цепи, низкие прибрежные равнины, высокогорные плато и пустыни. Большая часть территории страны лежит выше 1000 м над уровнем моря. Горные районы и нагорья занимают почти 2/3 площади страны, а низменности и равнины встречаются редко [14, 15]. Таким образом, для Мексики также характерны малоземелье и преобладание удаленных горных районов с труднодоступными поселениями.

3. Климат Азербайджана формируют географическое положение, рельеф и Каспийское море. В стране наблюдаются несколько типов климата: сухой степной, влажный субтропический, холодный горный и др. [16]. Климат Азербайджана предоставляет широкие возможности для увеличения производства электроэнергии и тепловой энергии за счёт использования солнечного излучения. Число солнечных часов в Азербайджане составляет 2400-3200 часов в год [8, 17].

Климат Мексики также формируют географическое положение, рельеф, мексиканский сегмент Тихого океана и Карибское море. Климат Мексики на севере – субтропический, в остальной части страны – тропический, на прибрежных равнинах – влажный и жаркий. В Мексике в течение года насчитывается около 3126,3 солнечных часов. В среднем в месяц продолжительность солнечного излучения достигает 102, 84 часов [16].

4. Основные приоритеты политики Азербайджана в социально-экономической сфере направлены на диверсификацию экономики за счет развития ненефтяного сектора, в том числе сельского хозяйства, возобновляемой энергетики и др. По оценкам экспертов Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA),

Азербайджан наряду с биомассовыми, геотермальными и гидроэнергетическими ресурсами обладает также высоким солнечным и ветряным потенциалами [18]. Активная деятельность по поддержке процессов развития зеленой энергетики поддерживается принятыми в последние годы политическими документами [19-21]. В этих документах значительное внимание уделено тенденции развития зеленой экономики в сельском хозяйстве Азербайджана. Так, одним из пяти основных национальных приоритетов является «чистая окружающая среда и зеленый рост». Особое внимание уделено высокому потенциалу использования солнечной энергии на освобожденных от оккупации территориях Азербайджана, являющихся преимущественно сельскохозяйственными. В настоящее время с привлечением ведущих компаний для обеспечения эффективного использования потенциала возобновляемых источников энергии, создания энергоэффективных технологий разрабатываются концепции и генплан по созданию зоны «зеленой энергии» на освобожденных территориях. Уже начаты работы по созданию первых «умных поселений» (smart village), базирующихся на технологиях Industry 4.0. Это предполагает широкое применение современных телекоммуникаций, умных сенсоров, интернета вещей, распределенной передачи, хранения и обработки больших данных, облачных вычислений и др. Как известно, с развитием технологий растет спрос на производство энергии, модернизацию инфраструктуры энергетики, создание надежных автономных систем электроснабжения.

Возобновляемые источники энергии имеют важное значение и большой потенциал в стимулировании социально-экономического развития Мексики. Так, правительством страны принята и реализуется Программа по обеспечению современной экологически чистой энергией почти 3 миллионов человек в удаленных сельских районах Мексики, не имеющих доступа к электричеству, а также по сокращению использования традиционной биомассы в бытовых целях [5, 10]. В последние годы компанией ENEL Green Power в Мексике предложены самые низкие в мире цены на солнечную энергию [22].

5. В настоящее время технический потенциал солнечной энергии оценивается как самый высокий среди ВИЭ, особенно в странах, обладающих значительными ресурсами годового солнечного излучения. Использование солнечной энергии могло бы помочь решению проблем, связанных с энергообеспечением на удаленных и

труднодоступных территориях Азербайджана и Мексики, имеющих сложный рельеф и страдающих от малоземелья. Наряду с выработкой электроэнергии, солнечные установки могут внести свой вклад в сельскохозяйственные системы, уменьшая ветровую эрозию, а также сберегая воду.

Азербайджан обладает благоприятными климатическими условиями, достаточным объемом тепла и света, позволяющими выращивать и собирать урожай некоторых сельскохозяйственных культур 2 раза в год.

Основным направлением сельскохозяйственного производства в стране является растениеводство, в том числе, зерноводство, овощеводство и бахчеводство, кормовые растения (ячмень, кукуруза, подсолнечник, неочищенный от шелухи рис), хлопководство, табаководство, чаеводство, картофелеводство, виноградарство, семенные, ядровые и другие виды фруктов [23].

Ведущей отраслью мексиканского сельского хозяйства также является растениеводство, а основные выращиваемые культуры — пшеница, кукуруза, соя, рис, бобы, кофе, помидоры, фрукты, хлопчатник [15].

На сегодня Азербайджан и Мексика уже имеют опыт установки и эксплуатации солнечных электростанций.

Так, в Азербайджане солнечные электростанции функционируют в Гобустане, в поселках Сураханы и Сахиль, на острове Пираллахи, в Самухском, Гарадагском районах, Сумгайыте и Нахчыване. Например, солнечная электростанция новая «Сураханы», расположенная на 7 гектарах, имеет запланированную общую мощность в 2,8 МВт. На станции установлено 8 тысяч солнечных панелей (Photovoltaic Panel, PV), которые способны вырабатывать в день почти 12 тысяч киловатт-часов электроэнергии. В будущем здесь предусмотрено установить еще 4 тысячи таких панелей.

В Мексике функционирует широкая сеть солнечных электростанций, установленных в различных регионах страны [5]. Большинство предлагаемых солнечных установок состоит из больших фотоэлектрических систем [3]. Строительство и эксплуатация таких систем, внедрение новых технологических решений могут внести значительные изменения в структуру сельского хозяйства и экономики рассматриваемых стран в целом.

### 3. Состояние проблемы использования солнечной энергии в сельском хозяйстве

По мере того как фотоэлектрические станции продолжают расти, использование земель под солнечные фермы усиливает конкуренцию за земельные ресурсы между производством продуктов питания и чистой энергии [24]. Хотя для фотоэлектрических систем требуется меньше земли, чем для других вариантов возобновляемой энергии [25], в действительности коммерческие фотоэлектрические электростанции могут занимать значительную площадь земли в местных масштабах.

Одним из первых зарегистрированных и описанных в литературе экспериментов по созданию агроэлектростанции на ферме было создание системы в Монпелье, Франция, в 2013 году [26]. Здесь выращивали салат в сочетании с системой, состоящей из фотоэлектрических модулей, установленных на сваях шириной 0,8 м. Один и тот же участок земли использовался для производства электроэнергии и продуктов питания. Результаты экспериментов показали, что затенение, создаваемое матрицами PV, не оказало значительного влияния на урожайность салата. Скорость роста под фотоэлектрическими панелями практически не снижалась.

На сегодняшний день предложено три типа агроэлектрических систем, которые позволяют одновременно выращивать урожай и производить электроэнергию на сельскохозяйственных угодьях. Первый тип был предложен в начале 1980-х годов с использованием фотоэлектрических панелей в пространствах между рядами для сельскохозяйственных культур [27]. Второй тип - фотоэлектрическая теплица, в которой часть прозрачной крыши заменена фотоэлектрическими панелями. Использование фотоэлектрической энергии для теплиц является многообещающим решением в борьбе за земельные ресурсы между производством продуктов питания и энергии, поскольку оно позволяет непрерывно производить продукты питания и вырабатывать электроэнергию в течение всего года [28]. Третий тип – это фотоэлектрические системы над посевами, установленные на опорах, которые состоят из труб и рядов фотоэлектрических панелей. Они устанавливаются на земле и расположены через определенные интервалы, чтобы позволить достаточному количеству солнечного света про-

никать к растениям для фотосинтеза. Система предназначена для обеспечения достаточного количества солнечного света для сельскохозяйственных культур и достаточного пространства для сельскохозяйственной техники. К тому же конструкция не имеет бетонного основания, поэтому ее легко разобрать.

Пример размещения солнечных концентраторов приведен на рис. 1.

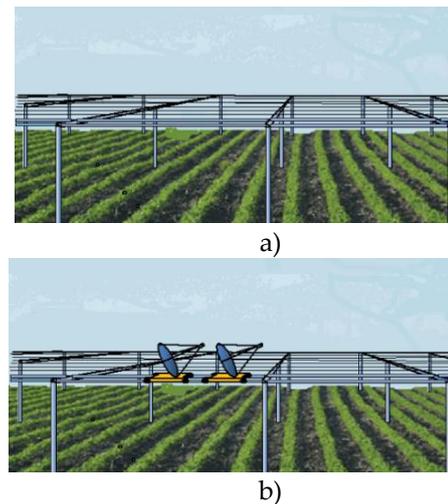


Рис. 1. Структура размещения солнечных концентраторов на агрополях: а) структура опор, б) структура с солнечными концентраторами [29]

В 2016 году в Индии солнечные установки и посадки алоэ были размещены вместе, чтобы максимально повысить эффективность использования воды в засушливых районах за счет объединения использования воды для очистки панелей и орошения, минимизации образования пыли посредством повышения влажности почвы и минимизации воздействия на природные территории посредством посева сельскохозяйственных культур, стимулирующих экономическую отдачу для улучшения жизни в сельской местности [3].

В 2018 году Амадуччи и Колауцци [30] предложили агроэлектрическую систему, солнечные слежения, построенные на подвесных конструкциях (сваях) (рис.2). Горизонтальная главная ось установлена на стойках, на которых шарнирно соединены второстепенные оси, поддерживающие солнечные панели. Два вала могут вращаться, приводя их в движение соединенными между собой электродвигателями благодаря инновационной системе беспроводной связи и управления.

Для моделирования роста и производства сельскохозяйственных культур, выращиваемых в тени системы Agrovoltaic, в Scilab [31] была разработана программная платформа, которая объединяет

модель излучения и затенения с универсальным симулятором роста растений GECROS [32]. Платформа предназначена для обслуживания и управления большими наборами климатических данных и различных экологических ситуаций с использованием реляционной базы данных бесплатного программного обеспечения.

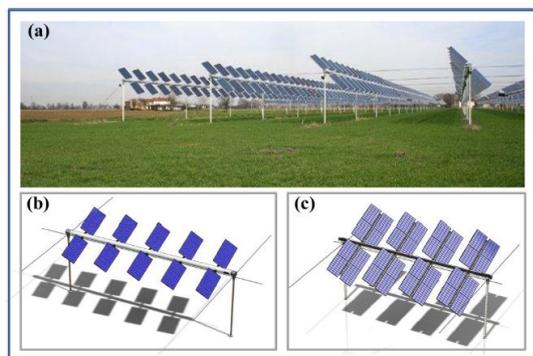


Рис.2. Агроэлектрическая система [30]

а) общий вид системы, б) узел, оборудованный 5 вторичными осями и 10 солнечными панелями, в) узел, оборудованный 4 вторичными осями и 32 солнечными панелями

Платформа предназначена для обслуживания и управления большими наборами климатических данных и различных экологических ситуаций с использованием реляционной базы данных программного обеспечения с открытым доступом. Модель сельскохозяйственных культур GECROS прогнозирует биомассу и урожайность в зависимости от климатических факторов (радиация, температура, скорость ветра и влажность) и доступного количества воды и азота в почве. Модель представляет реакцию сельскохозяйственных культур на отдельные физиологические процессы и переменные окружающей среды, таким образом, включая механизмы, которые управляют динамикой сельскохозяйственных культур.

Нами предлагается использовать солнечные концентраторы на полях Мексики и Азербайджана. Для Мексики это могут быть системы совместно с такими распространенными культурами, как бобы, кукуруза, агавы. Для Азербайджана это могут быть плантации ранних овощей, поля картофеля или свеклы. Пространство между рядами растений можно использовать для размещения солнечных концентраторов. При этом размеры параболической поверхности практически не влияют на растения.

#### 4. Проблемы совмещения солнечной энергетики и сельского хозяйства

Во всем мире спрос на энергию быстро растет, это, в свою очередь, обуславливает рост потребности в использовании зеленой энергии для орошения, бытовых целей и т.д.

В работах [2-4, 24-26] рассмотрены возможности установки солнечных концентраторов в сочетании с инфраструктурой сельскохозяйственного поля. Показано, что такие системы экономически жизнеспособны в некоторых сельских районах и могут предоставить возможности для электрификации последних, одновременно стимулируя их экономический рост. Первая проблема, которую необходимо решить в совмещении солнечной энергетики и сельского хозяйства, - это выбор типов солнечных концентраторов и наиболее подходящих сельскохозяйственных культур для таких концентраторов (Рис. 3).

Потребности в солнечной энергии различаются для разных культур в зависимости от их метаболизма и времени использования солнечного света. Конструкция солнечных концентраторов и методы размещения (расстояние и высота стоек) могут генерировать различное количество энергии в соответствии с требованиями выбранных культур.

Один из интересных вариантов может быть получен с использованием солнечных концентраторов, имеющих форму параболической тарелки, покрытой треугольными или квадратными плоскими зеркалами. Пример разработки таких концентраторов можно найти в [33 – 37]. Этот тип солнечного концентратора имеет малую цену за счет моделирования параболической поверхности плоскими зеркалами, и малые размеры (от 2 до 3 метров в диаметре). Такой концентратор работает в двух режимах: 1) в режиме захвата солнечной энергии, когда ось параболической тарелки ориентирована на солнце; 2) в режиме минимальной тени, когда ось параболической тарелки ориентирована перпендикулярно направлению солнца.

Гипотеза основана на идее размещения солнечных устройств на территориях, занятых сельскохозяйственными культурами, так, чтобы взаимное влияние между ними было минимальным, и – таким образом, можно было бы получить пользу от солнечных устройств для сельскохозяйственных культур.

Солнечные концентраторы могут быть использованы также для хранения дождевой воды для орошения, построения систем сбора дож-

девой воды рядом или вокруг них. Эти устройства могут быть выполнены в виде перевернутых зонтов, которые открываются во время дождя и закрываются, когда нет дождя, что позволяет использовать накопленную воду для орошения за счет солнечной энергии.

Основной целью данного исследования является разработка методики оценки эффективности возможных моделей комбинации солнечных концентраторов с определенным видом растений. Предлагаемая нами методика предполагает решение двух задач.

Первая задача заключается в разработке математической модели, которая включает два

важных шага. Первый шаг предполагает разработку аналитической модели с параметрами, характеризующими сельскохозяйственные поля. На втором шаге проводится оценка характеристик солнечного концентратора.

Вторая задача заключается в компьютерной реализации разработанной модели и позволяет виртуализировать процессы взаимодействия культур на сельскохозяйственном поле и размещения на нем солнечных концентраторов таким образом, чтобы получить максимальную производительность обоих.

Рассмотрим подробнее реализацию первой задачи.

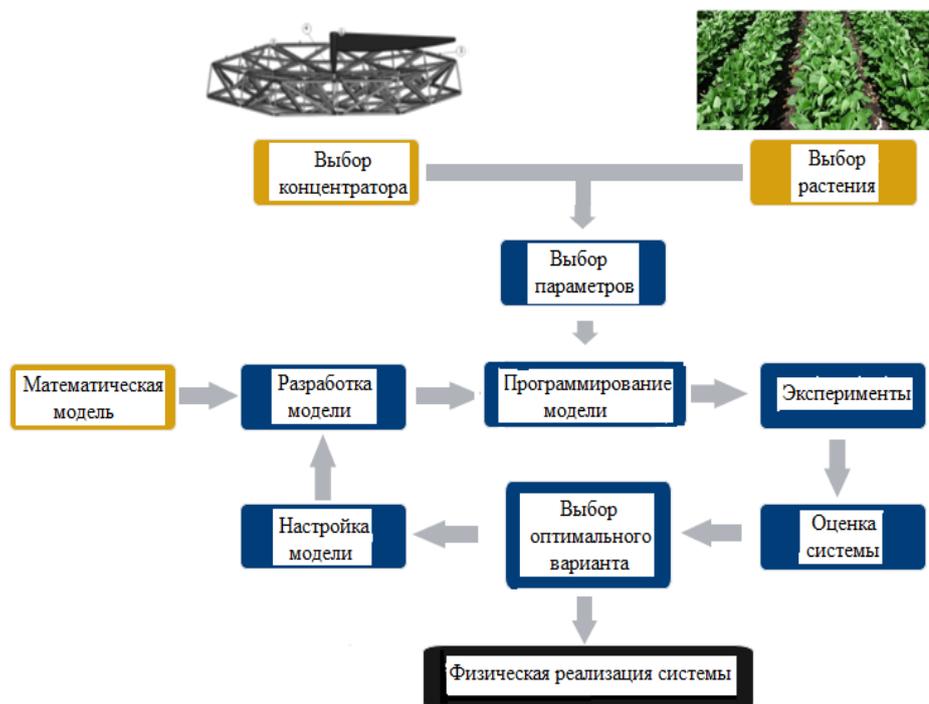


Рис.3. Схема совмещения солнечной энергетики с сельскохозяйственными растениями

### 5. Оценка эффективности возможных моделей сочетания сельскохозяйственных растений с солнечными концентраторами

Параметры, которые учитываются в полях, - это площадь поля, его уклон, тип почвы, влажность, расстояние между рядами, тип культуры, густота урожая, максимальная ширина растения, высота растения. У растений – раздражимость к внешним агентам (свет, температура, влажность и др.) и развитие растений, определяемое сроками посева, прорастания, роста и сбора урожая.

Целевая функция может включать все эти параметры или некоторые из них, наиболее важные в конкретной ситуации. Самая простая

модель – это линейная модель. В этом случае целевая функция имеет следующий вид:

$$f_1(x) = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n, \quad (1)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – выбранные параметры для поля и растений,  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – коэффициенты, полученные расчетным или экспериментальным путем для конкретной задачи.

Характеристики, которые учитываются в солнечных концентраторах, – это их размеры, вес, ширина пластины или диаметр тарелки, производимая тень, монтажная конструкция, материал конструкции, распределение и количество солнечных концентраторов. Вид целевой функции выбирается в зависимости от конкретной задачи. В этом случае целевая функция может быть представлена следующим образом:

$$f_2(y) = b_1 y_1 + b_2 y_2 + b_3 y_3 + \dots + b_m y_m, \quad (2)$$

где  $y_1, y_2, \dots, y_n$  – выбранные параметры характеристик солнечных концентраторов,  $b_1, b_2, \dots, b_n$  – коэффициенты, полученные расчетным или экспериментальным путем.

Ряд перечисленных параметров можно получить из различных статистических таблиц, например, урожайность тех или иных сельскохозяйственных культур. Некоторые из параметров требуют дополнительных математических расчетов, например, сколько концентраторов можно разместить на поле с определенным заранее расстоянием между опорами и т.п. Определенные значения можно получить в процессе функционирования первого реального прототипа системы совмещения.

Эффективность работы системы оценивается двумя основными критериями. Первый критерий – это максимизация урожайности на поле, а второй критерий – это максимальное количество солнечных концентраторов, распределенных на поле.

Исходя из этих целей, конструируют первые целевые функции и модели. С учетом этих функций и соотношения параметров солнечных концентраторов и полей возделывания, можно получить второстепенные цели.

В этой работе для сельскохозяйственных культур нами выделены следующие параметры:

- размеры обрабатываемого поля;
- тип почвы;
- солнечное излучение в зоне выращивания;
- определение культурного растения;
- размер растения;
- расстояние между растениями;
- этапы роста растений;
- влажность.

Для солнечных концентраторов важны следующие параметры:

- размеры солнечного концентратора;
- вес концентратора;
- размеры опорной конструкции солнечной батареи в зоне выращивания;
- положение и ориентация.

На основе этих целевых функций будут определены новые функции для определения взаимосвязи между параметрами полей и характеристиками концентраторов. Например, определение степени устойчивости опоры солнечного концентратора на земле или количество теней, отбрасываемых солнечными концентраторами на растения в течение дня.

По результатам первого этапа разрабаты-

вается компьютерная система, которая позволяет получить наилучшее размещение солнечных концентраторов на поле сельскохозяйственных культур. Эта компьютерная система определяет наилучшую стратегию распределения солнечных концентраторов до ее внедрения в реальных условиях. Компьютерная система может быть разработана как разработчиками модели, так и могут использоваться известные программные системы, например, программные модули, описанные в [31].

## 6. Возможные варианты реализации модели

В целостной системе, сочетающей возобновляемые источники энергии и сельскохозяйственные поля, могут использоваться новые конструкции солнечных концентраторов. На рис. 4 показано несколько прототипов солнечных концентраторов, разработанных и запатентованных в Мексике, Испании и Соединенных Штатах Америки [2, 33 – 37]. Разработанные прототипы имеют 1 метр в диаметре. Поскольку опорная конструкция сделана из алюминиевых стержней, она легкая. Стоимость материалов для прототипов низкая. Например, стоимость плоских зеркал сейчас на рынке около 3 долларов за квадратный метр. Единственный этап, затратный с точки зрения времени и денег, – это сборка. Этот этап в будущем требует автоматизации, что значительно удешевит процесс сборки. За последние несколько лет разработана технология создания микрооборудования (Micro Equipment technology, MET) [38].

В качестве приложения MET была выбрана задача по производству солнечных концентраторов. Разработаны различные типы солнечных концентраторов с плоскими зеркалами и изготовлены их прототипы.

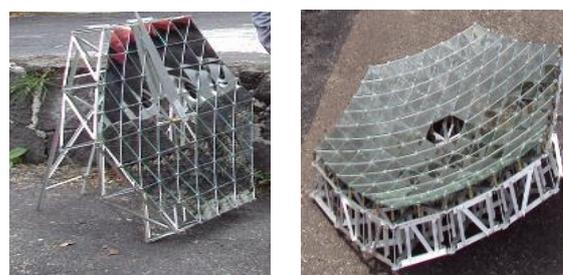


Рис. 4. Прототипы солнечных концентраторов с плоскими зеркалами

Эти концентраторы возможно устанавливать на горизонтальных крышах зданий, которых много как в городах, так и в поселках Мексики.

Установка солнечных концентраторов на сельскохозяйственных полях – это новая тенденция. В настоящем исследовании в качестве примера предлагается использовать эти солнечные концентраторы на картофельных полях в Азербайджане и на полях агавы в Мексике для получения двойных преимуществ, таких как выработка электроэнергии и минимальные потери урожая.

В Азербайджане период активной сельскохозяйственной деятельности, например, для посадки картофеля или свеклы, в зависимости от региона начинается с конца февраля и продолжается по апрель. Сорта картофеля делятся в зависимости от того, через сколько дней после посадки можно начинать выкапывать клубни: ранние – через 50–65 дней; среднеранние – через 65–80 дней; среднеспелые – через 80–95 дней; среднепоздние – через 95–110 дней; поздние – через 110 и более дней. Ряды посадки обычно имеют достаточную ширину для размещения солнечных концентраторов.

В Мексике выращивание начинается в апреле и заканчивается в октябре или ноябре [30]. В течение этого 7-месячного периода можно использовать солнечные концентраторы. В начале мая растения не потребляют много солнечной энергии, за это время можно без проблем разместить солнечные концентраторы. Но к концу второго месяца растения полностью вырастают и нуждаются в большем количестве солнечного света. В этом случае солнечные концентраторы можно убрать с поля и положить на хранение. В период с ноября по апрель концентраторы можно разместить по всему полю.

## 7. Заключение

Нами предлагается создание комплексных систем для получения электроэнергии и сельскохозяйственной продукции на одном земельном участке благодаря использованию солнечной энергетики. Предложенные модели без необходимости проведения эмпирических исследований непосредственно на поле позволяют оценивать распределение солнечных концентраторов и избежать процесс их сборки в поле, получать результаты без проведения экспериментов с реальными циклами посева и сбора урожая. Предложенные модели без необходимости проведения эмпирических исследований непосредственно на поле позволяют оценивать распределение солнечных концентраторов и избежать процесс их сборки

в поле, получать результаты без проведения экспериментов с реальными циклами посева и сбора урожая. Без необходимости изменять или экспериментировать непосредственно на поле, модель позволяет оценивать распределение концентраторов на полях, избежать процесса сборки солнечных концентраторов в поле и получать результаты без проведения экспериментов с реальными циклами посева и сбора урожая.

Следующий этап исследований включает в себя разработку оптимальной стратегии размещения солнечных концентраторов среди сельскохозяйственных культур и изготовление новых прототипов солнечных концентраторов с параметрами, полученными после экспериментальных испытаний.

Предлагаемая система включает двойной источник дохода для фермеров, возможности трудоустройства как на солнечных объектах, так и для выращивания сельскохозяйственных культур, электрификацию сельских районов и доступность электроэнергии для местной переработки сельхозпродукции.

Благодаря своим геопространственным положениям Азербайджан и Мексика расположены в привилегированных регионах солнечного излучения, имеют много возможностей для практического использования солнечной энергии.

**Благодарности:** Работа частично поддержана проектом UNAM-DGAPA-PAPIIT IT 102320

## Литература

1. The Paris Agreement. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
2. Kussul, E., Baydyk, T., Escalante Estrada A., Rodríguez González M.T., Wunsch, II D.C. (2019). Solar concentrators manufacture and automation, *Open Physics*, vol. 17, 93-103.
3. Ravi, S., Macknick, L, Lobell, D, Field, C, Ganesan, K, Jam, R, Elchinger, M., and Stoltenberg, B. (2016). Collocation opportunities for large solar infrastructures and agriculture in dry lands. *Applied Energy* 165:383-92.
4. Sekiyama, T., and Nagashima, A. (2019). Solar sharing for both food and clean energy production: performance of agrivoltaic systems for corn: a typical shade-intolerant crop." *Environments* 6: 65.
5. REmap 2030, Renewable Energy Prospects: Mexico. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA\\_REmap\\_Mexico\\_report\\_2015.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_Mexico_report_2015.pdf)
6. Gibran, S.Aleman-Nava, Victor, H.Casiano-Flores, Diana L.Cardenas-Chavez, Rocío Díaz-Chavez, Nicolae, Scarlat, Jürgen, Mahlknecht, Jean-Francois, Dallemand, Roberto, Parra (2014). Renewable energy research progress in Mexico: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 32, April 2014, 140-153.

- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.004>
7. Энергетический профиль Азербайджана.  
<https://www.eeseaec.org/energeticeskij-profil-azerbajdzana>
  8. Выступление Президента Азербайджана Ильхама Алиева на ежегодных общих дебатах 76-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН в видеоформате. (24.09.2021) <https://president.az/ru/articles/view/53197>
  9. Энергетический профиль Мексики.  
<https://www.eeseaec.org/energeticeskij-profil-meksiki>
  10. Mexico – Country commercial Guide. Renewable Energy, 2021-09-02 <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/mexico-renewable-energy>
  11. География Азербайджанской Республики. Физическая география (2014). Баку.
  12. Алиев Р.А., Исмаилова Г.Ф. (2015). «Зеленая экономика» в Азербайджанской Республике: предпосылки и направления развития, Интернет-журнал «Науковедение», 7(6). <http://naukovedenie.ru/PDF/107EVN615.pdf>
  13. Экоцид в Карабахе.  
<https://karabakh.center/d/page18217289.html>
  14. Мексика. Общая информация о стране.  
<https://marakuya.kiev.ua/mexico-state.html>
  15. Мексика. География, описание и характеристики страны. Журнал «Сезоны года»  
<https://сезоны-года.рф/страна%20Мексика.html>
  16. Климат Мехико (Мексика), Climate/Data.Org  
<https://ru.climate-data.org/северная-америка/мексика/федеральный-округ/Мехико-1093/>
  17. Возобновляемые источники энергии в Азербайджане.  
<https://www.hisour.com/ru/renewable-energy-sources-in-azerbaijan-37392/>
  18. Renewables Readiness Assessment: Republic of Azerbaijan.  
<https://www.irena.org/publications/2019/Dec/RRA-Republic-of-Azerbaijan>
  19. Распоряжение Президента Азербайджана от 2 февраля 2021 года об утверждении «Национальных приоритетов по социально-экономическому развитию»  
<https://president.az/az/articles/view/50474>
  20. Распоряжение Президента Азербайджанской Республики от 19 апреля 2021 года «О подготовке концепции «умный город» (smart city) и «умное село» (smart village)».  
[https://azertag.az/ru/xeber/Rasporyazhenie\\_Prezidenta\\_Azerbaidzhanskoi\\_Respubliki\\_O\\_podgotovke\\_koncepcii\\_Umnyi\\_gorod\\_Smart\\_City\\_i\\_Umnoe\\_selo\\_Smart\\_Village-1759433](https://azertag.az/ru/xeber/Rasporyazhenie_Prezidenta_Azerbaidzhanskoi_Respubliki_O_podgotovke_koncepcii_Umnyi_gorod_Smart_City_i_Umnoe_selo_Smart_Village-1759433)
  21. Распоряжение Президента Азербайджана от 3 мая 2021 года «О мерах по созданию зоны «зеленой энергии» на освобожденных от оккупации территориях Азербайджанской Республики»  
<https://president.az/ru/articles/view/51355>
  22. В Мексике установлена самая низкая в мире цена на солнечную энергию.  
<https://hightech.fm/2017/11/17/cheapest-electricity>
  23. Сельское хозяйство – Азербайджан.  
[https://www.azerbaijans.com/content\\_465\\_ru.html](https://www.azerbaijans.com/content_465_ru.html)
  24. Nonhebel, S. (2005). “Renewable Energy and Food Supply: Will There Be Enough Land?” *Renew. Sustain. Energy Rev.* 9: 191-201.
  25. Fthenakis, V., and Kim, H.C. (2009). “Land Use and Electricity Generation: A Life-Cycle Analysis.” *Renew Sustain. Energy Rev.* 13: 1465-74.
  26. Marrou, H., Guilioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., and Wery, J. (2013). “Microclimate under agrivoltaic systems: Is Crop Growth Rate Accepted in the Partial Shade of Solar Panels?” *Agric. For. Meteorol.* 177: 117-32.
  27. Goetzberger, A., and Zastrow, A. (1982). “On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation.” *Int. J. Sol. Energy* 1: 55-69.
  28. Scognamiglio, A. (2014). “Photovoltaic Greenhouses: A Feasible Solution for Islands? Design, Operation Monitoring and Lessons Learned from a Real Case Study.” Presented at the 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Kyoto, Japan.
  29. E., Kussul, T., Baydyk, N., Garcia, G., Velasco, Herrera, A.V. Curtidor, Lopez. (2020). Combinations of solar concentrators with agricultural plants, *Journal of Environmental Science and Engineering*, 9(5), Sept. Oct. 2020, (serial number 86), 168-181.  
<https://doi.org/10.17265/2162-5263/2020.05.002>
  30. Amaducci, S., Yin, X., and Colauzzi, M. (2018). “Agrivoltaic Systems to Optimize and Use for Electric Energy Production.” *Applied Energy* 220: 545-561.
  31. Scilab Enterprises and Consortium Scilab. Digiteo. Scilab: Free and OpenSource software for numerical computation (OS, Version 5.4.1); 2012 [Software] <<http://www.scilab.org>>.
  32. Yin, X, Van Laar, H. (2005). Crop systems dynamics: an ecophysiological simulation model for genotype-by-environment interactions. Wageningen Academic Pub.
  33. Kussul, E., Baidyk, T., Makeyev, O., Lara-Rosano, F., Saniger, J. M., and Bruce, N. (2007). “Development of Micro Mirror Solar Concentrator.” *WSEAS Transactions on Power Systems* 8 (2): 188-94.
  34. Kussul, E., Baidyk, T., Makeyev, O., Lara-Rosano, F., Saniger, J. M., and Bruce, N. (2008). “Flat Facet Parabolic Solar Concentrator with Support Cell for One and More Mirrors.” *WSEAS Transactions on Power Systems* 8 (3): 577-86.
  35. Kussul, E., Makeyev, O., Baidyk, T., Saniger Blesa, J., Bruce, N., and Lara-Rosano, F. (2011). “Adjustment of Solar Concentrator Support Frame.” In *Proc. of the Intern. Conf. on Innovative Technologies*, Bratislava, Slovakia, 314-6.
  36. Kussul, E., Makeyev, O., Baidyk, T., Saniger Blesa, J., Bruce, N., and Lara-Rosano, F. (2011). “The Problem of Automation of Solar Concentrator Assembly and Adjustment.” *Intern. J. of Advanced Robotic Systems* 8 (4): 150-7.
  37. Kussul, E., Makeyev, O., Baidyk, T., Saniger Blesa, J., and Bruce, N. (2012). “Ericsson Heat Engine with Microchannel Recuperator for Solar Concentrator with Flat Mirrors”, *Intern. J. of Energy*, 6(4), 165-177.
  38. Kussul, E., Baidyk, T., Ruiz-Huerta, L., Caballero, A., Velasco, G., Kasatkina, L. (2002). Development of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12, 795-813.

Tetyana Baydyk<sup>1</sup>, Masuma H. Mammadova<sup>2</sup>, Ernst Kussul<sup>3</sup>, Graciela Velasco Herrera<sup>4</sup>, Airam Curtidor<sup>5</sup>

<sup>1,3,4,5</sup>Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Circuito Exterior s/n, Cd. Universitaria, México, 04510, México

<sup>2</sup>Azerbaijan National Academy of Sciences, Institute of Information Technology, B.Vahabzade str., 9A, AZ1141 Baku, Azerbaijan

Tetyana Baydyk<sup>1</sup>, Məsumə H. Məmmədova<sup>2</sup>, Ernst Kussul<sup>3</sup>, Graciela Velasco Herrera<sup>4</sup>, Airam Curtidor<sup>5</sup>

<sup>1,3,4,5</sup>Tətbiqi elmlər və texnologiya İnstitutu, Meksika Milli Avtonom Universiteti.

Sirkuito Eksterior, Ciudad Universitaria, Mexico, 04510, Meksika

<sup>2</sup>Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası, İnformasiya Texnologiyaları İnstitutu, B.Vahabzadə küç., 9A, AZ1141, Bakı, Azərbaycan



<sup>1</sup>0000-0002-3095-2032; <sup>2</sup>0000-0002-2205-1023; <sup>3</sup>0000-0002-2849-2532