

АНАЛИЗ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО РЕСУРСА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ
ТЕРРИТОРИИ ОБЪЕКТА АПК

Ю. В. Даус

Реферат. Одна из задач многофакторной оценки ресурса солнечной энергии на рассматриваемой территории – оценка влияния ограничения утилизируемого ресурса условиями застройки места расположения среды. При поиске подходящих ограждающих конструкций для установки фотоэлектрических модулей учитывается геометрия и пространственная ориентация зданий, их взаимное размещение, эффекты затенения. Цель исследования – разработать критерий идентификации запрещённых и разрешённых участков территории объекта АПК для установки фотоэлектрических модулей. Исключение зон с неравномерными условиями освещённости позволяет обеспечить максимальную эффективность функционирования фотоэлектрической установки. Запрещёнными участками для установки модулей фотоэлектрической системы можно считать те, которые затеняются в течение характерного летнего дня, а также в пик интенсивности солнечной радиации во все характерные дни года. Разрешёнными для установки модулей фотоэлектрической системы участками можно считать те, которые освещены в течение каждого дня года. Остальные участки необходимо либо исключать из плана установки модулей фотоэлектрической системы, либо применять различные способы снижения влияния затенения модулей на их эффективность (установка байпасных диодов, применение различных схем соединения модулей и др.). На примере территории действующего перерабатывающего сельскохозяйственного предприятия была проанализирована возможность установки модулей на крышах производственных зданий с учетом изменения освещённости приёмной поверхности скатов крыш зданий для пика интенсивности в течение характерных дней года. При площади территории предприятия 55748 м², из которой под застройку отведено 13,8% – 7737 м², под установку фотоэлектрических модулей с учетом режима инсоляции территории может быть использовано 2377,5 м², или 30,7 % крыш зданий.

Ключевые слова: фотоэлектрическая система, режим инсоляции территории, объект АПК, коэффициент освещённости, запрещённые и разрешённые участки.

Введение. Одна из задач многофакторной оценки ресурса солнечной энергии рассматриваемой территории – оценка влияния ограничения утилизации ресурса условиями застройки места расположения среды. При определении географического ресурса солнечной энергии необходимо исключить земли сельскохозяйственного назначения, зоны прохода и работы сельскохозяйственной техники, дороги, выделить доступные площади ограждающих конструкций зданий для установки фотоэлектрических модулей. При поиске ограждающих конструкций для установки фотоэлектрических модулей учитывается геометрия и пространственная ориентация зданий, их взаимное размещение, эффекты затенения [1].

Затенение (полное либо частичное), вызванное облаками, деревьями, соседними зданиями, надстройками, снегом, пылью, грязь, птичьим пометом, – одна из основных причин потери энергии при эксплуатации фотоэлектрической системы: на 44% при затенении 25...50% модулей, на 74% – при затенении 75% модулей, на 80% – при полном затенении. Наличие тени на фотоэлектрических модулях вызывает полную или частичную блокировку прямого солнечного излучения, приходящего на их принимающую поверхность, в результате чего модуль становится эквивалентным резистору, который потребляет энергию, генерируемую соседними элементами. Впоследствии повышается температура ячейки и она повреждается (так называемый эффект горячей точки) [2]. Кроме того, если загрязнение поверхности фотоэлектрического модуля

может быть ликвидировано, то затенение её соседними зданиями и другими объектами – нет, поэтому при выборе места размещения модулей фотоэлектрической системы в условиях застройки территории объекта АПК, очень важно учитывать ход теней, так как попадание модулей в тень требует применения подходов по уменьшению влияния эффекта затенения [3, 4].

Для уменьшения потерь энергии при затенении фотоэлектрических модулей применяют методы трех основных категорий: оптимизация состава фотоэлектрической системы, изменение схемы соединения фотоэлектрических модулей и введение дополнительных элементов в массив модулей фотоэлектрической системы [5, 6, 7].

На сегодняшний день существует большое количество коммерческих программных инструментов и приложений для оценки эффективности работы массива фотоэлектрических модулей в различных условиях освещённости, однако, несмотря на разнообразие и высокий уровень реализации, применение их достаточно ограничено.

В практике гелиотехнических расчетов существуют два основных принципиально разных подхода к оценке снижения выработки электрической энергии фотоэлектрической системой с частично затенёнными модулями [8]. Один из них основан на моделировании теней, отбрасываемых окружающими предметами и динамики изменения и движения тени во времени. Если размеры и расположение затеняющих объектов известны, форму и размер тени, отбрасываемой на массив

фотоэлектрических модулей, можно определить в любой момент времени. При дальнейшем использовании экспериментальных или прогнозируемых метеорологических данных можно очень точно рассчитать поток солнечного излучения, приходящего на поверхность модуля для каждого периода времени. Главные недостатки такой модели – необходимость информации с высоким пространственным и временным разрешением о топографии местности, размерах и пространственной ориентации размещенных на ней объектов, а также длительное время обработки и вычислений.

В основе второго подхода оценки снижения выработки электрической энергии фотоэлектрической системой при затенении модулей лежит анализ уменьшения солнечного излучения, фиксируемого с определенной точки наблюдения на поверхности фотоэлектрического модуля. Большинство программных продуктов моделирования режима функционирования модуля в условиях затенения используют такой подход, когда затенение рассматривается как пространственно-угловое описание уменьшения горизонта, вызванного окружающими объектами. При этом в качестве исходных данных используют не размер затеняющих окружающих объектов, а их двумерную пространственную угловую карту на единичной сфере вокруг точки наблюдения. Но для подробного анализа режима функционирования фотоэлектрической системы такой подход не применяют.

В результате большого количества теоретических и лабораторных исследований, апробированных подходов математического моделирования, проведенных экспериментов в реальных условиях появился ряд рекомендаций по оптимальному расположению массивов модулей фотоэлектрических систем. Например, известны работы, посвященные определению оптимального технологического интервала между соседними рядами фотоэлектрических модулей с целью минимизации их взаимного затенения [9].

Однако влияние расположения модулей на выработку электрической энергии частично затененным массивом фотоэлектрических модулей еще не совсем ясно. В практических ситуациях необходимо учитывать большое количество таких факторов, как особенности функционирования МРР-трекера, напряжение шины постоянного тока, схема соединения модулей между собой, тип инвертора, и, конечно, динамическое изменение условий затенения.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что из-за высокой чувствительности фотоэлектрического модуля к условиям освещенности, которая сопровождается существенным снижением выработки электрической энергии, возникновением аварийных режимов работы, необходимостью реконфигурации и, как следствие, существенным удорожанием проекта

фотоэлектрической системы, необходимо решить задачу выявления на территории объекта электроснабжения от солнечной фотоэлектрической системы частично или полностью затененных зон и провести анализ целесообразности их использование под установку модулей системы.

Установка фотоэлектрических систем на обширных природных территориях с подключением к Единой энергетической системе не всегда возможна в виду особенностей природного ландшафта, приоритетности территорий сельскохозяйственного назначения, высокой стоимости построения системы передачи электрической энергии к потребителю. Поэтому всё большее внимание привлекают интегрированные в существующую инфраструктуру и топологию объекта электроснабжения фотоэлектрические системы. При обосновании ее параметров в исходные данные чаще всего входит доступная площадь поверхности крыши для установки модулей. Такая информация может быть получена на основе карт землепользования, масштабируемой методологии оценки поверхности крыши, различных данных геоинформационных систем (ГИС) [10].

В работе [11] отмечено, что оценка ресурса солнечной энергии, приходящей на приемную площадку в условиях застройки, возможна путем исключения затененных зон. Эта величина рассчитывается по часам в виде отношения освещенной части крыши здания к её общей площади и может варьировать от 35% в утреннее и вечернее время до 75% в период пика солнечной активности и это выступает существенным ограничением при реализации ресурса солнечной радиации рассматриваемой территории. Аналогичный подход был использован в работе [12], где в формулу выработки электрической энергии фотоэлектрическим модулем был введен корректирующий коэффициент, учитывающий форму крыши, наличие дымоходом, порогов, световых окон, затененность, соотношение размера модуля к размерам крыши для обеспечения необходимого технологического интервала между рядами модулей. В работе [13] говорится о снижении выработки электрической энергии модулем при размещении на ограждающих конструкциях здания (в частности, крыше), а для её оценки используется коэффициент, который учитывает конструктивные ограничения, затененность и пространственную ориентацию поверхности крыши, отклонение величины этого показателя от оптимальной, необходимый технологический интервал между рядами модулей для обеспечения полной освещенности и обслуживания.

Таким образом, актуальна разработка универсального метода определения участков полной, частичной освещенности и затенения, выделение которых даст возможность обозначить рекомендованные либо запрещенные к установке модулей фотоэлектрической системы участки с учетом топологии территории

объекта АПК.

Цель исследования – разработать критерий определения запрещённых и разрешённых участков территории объекта АПК для установки фотоэлектрических модулей с учетом режима её инсоляции.

Условия, материалы и методы. Доступную площадь для установки фотоэлектрических модулей с учетом затенения от окружающих объектов можно рассчитать по уравнению:

$$S_{\text{дост уч}} = K_{\text{осв}} \cdot S_{\text{уч}} \quad (1)$$

где $S_{\text{уч}}$ – площадь рассматриваемого участка под установку фотоэлектрических модулей системы, м²; $K_{\text{осв}}$ – коэффициент освещенности приёмной поверхности участка, о.е..

В виду постоянного движения Солнца над горизонтом в течение дня коэффициент освещенности приёмной поверхности участка ($K_{\text{осв}}=f(t, n)$) зависит от времени суток, для которого он рассчитывается, и определяется по формуле:

$$\begin{cases} K_{\text{осв}} = \frac{S_{\text{уч}} - S_{\text{зат}}}{S_{\text{уч}}}, \\ \text{если } S_{\text{уч}} \leq S_{\text{зат}}, \text{ то } K_{\text{осв}} = 0, \\ \text{если } S_{\text{уч}} < S_{\text{зат}}, \text{ то } K_{\text{осв}} = 1, \end{cases} \quad (2)$$

где $S_{\text{зат}}$ – затеняемая площадь, определяемая положением Солнца над горизонтом в рассматриваемый момент времени t для дня n , и высотой соседних объектов, м².

Коэффициент освещенности приёмной поверхности участка принимает значение от 0 (участок полностью затенен) до 1 (участок полностью освещен).

В качестве моментов времени используем следующие:

время суток с наибольшей интенсивность солнечной радиацией ($t = 14^{00}$) для 4 характерных дней, когда фотоэлектрическая система работает с максимальной мощностью;

изменение коэффициента освещенности приёмной поверхности участка в течение дня с самой высокой и самой низкой (22 декабря $n = 356$) интенсивностью солнечной радиацией (22 июня $n = 172$): $t = 10^{00}$ и 18^{00} – утреннее и вечернее время, часто для сельскохозяйственного потребителя время максимума нагрузки и $t = 12^{00}$ и 16^{00} – время высокой интенсивности солнечной энергии рассматриваемого дня;

изменение коэффициента освещенности приёмной поверхности участка в течение характерного осеннего дня (23 сентября $n = 265$): $t = 10^{00}$ и 18^{00} – утреннее и вечернее время и $t = 12^{00}$ и 16^{00} – время высокой интенсивности солнечной энергии рассматриваемого дня.

Результатом анализа изменения освещенности участка для установки фотоэлектрических модулей служит массив значений

освещенности приёмной поверхности участка для различных моментов времени. На основе этих данных можно идентифицировать разрешенные и запрещенные участки для установки фотоэлектрических модулей системы.

Запрещенными для установки модулей фотоэлектрической системы можно считать те участки, которые затеняются в течение летнего характерного дня, а также в пик интенсивности солнечной радиации всех характерных дней года:

$$S_{\text{запрещен}} \in S_{\text{зат}} \text{ для } \begin{cases} t = (1 \dots 24; 1), n = 172; \\ t = 14, n = 79, 265, 356. \end{cases} \quad (3)$$

Разрешенными участками для установки модулей фотоэлектрической системы можно считать те, что освещены равномерно в течение каждого дня года:

$$S_{\text{разреш}} \notin S_{\text{зат}} \text{ для } t = (1 \dots 24; 1), n = (1 \dots 365; 1) \quad (4)$$

Остальные участки необходимо либо исключать из плана для установки модулей фотоэлектрической системы, либо применять различные способы снижения влияния затенения модулей на эффективность их работы (установка байпасных диодов, применения различных схем соединения модулей и др.).

Расчет часовых сумм суммарной солнечной радиации, приходящей на произвольно ориентированную в пространстве приемную поверхность, проводил с использованием программного комплекса [14].

Объект исследования – территория действующего перерабатывающего сельскохозяйственного предприятия («Завод Сорго» ФГБНУ АНЦ Донской) с указанием геометрических размеров и пространственной ориентации зданий, направления и угла наклона крыш относительно горизонта (рис. 1).

Результаты и обсуждение. С учетом ориентации по сторонам света, размеров крыш зданий и размещения потребителей на территории предприятия, для монтажа модулей фотоэлектрических систем выбраны крыши зданий №1, 3, 6, 9, 11 (сушильно-очистительная башня с силосохранилищем, склад готовой продукции, административное здание, склады), из которых крыша здания №6 – плоская, здания №1 – ориентирована одним скатом на юг, здания №3, 9, 11 – ориентированы длинной стороной ската на восток и запад.

Рассмотрим возможность установки модулей на крышах указанных производственных зданий с учетом затенения.

Результаты анализа коэффициентов освещенности приёмной поверхности скатов крыш зданий для пика её интенсивности в течение суток для характерных дней года свидетельствуют, что под самое значительное затенение попадает здание 9 в момент максимума интенсивности приходящей солнечной радиации (табл. 1): полностью в зимний, осенний и весенний характерный день и на 50% в летний день.

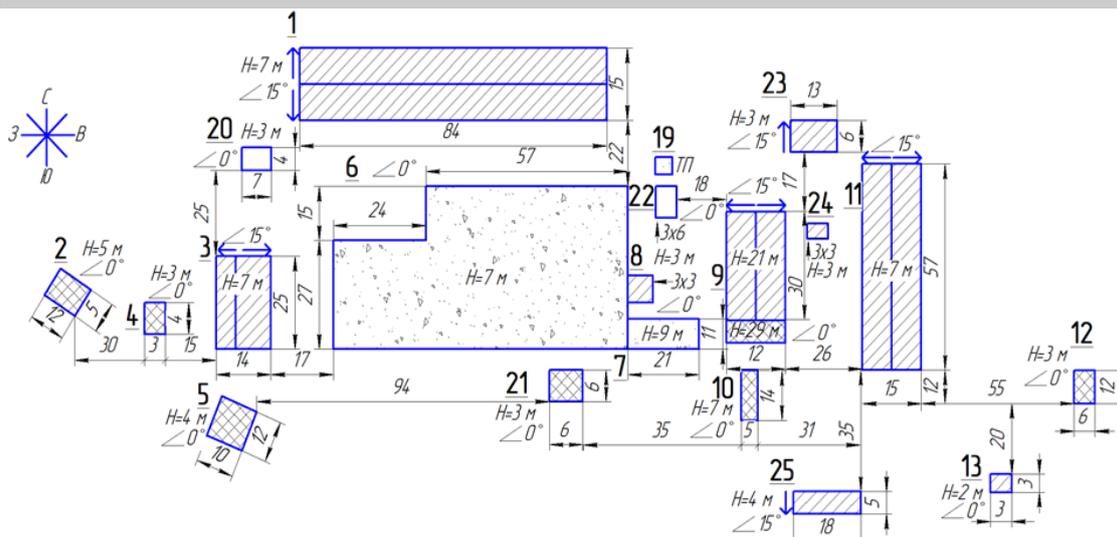


Рис. 1 – Генплан сельскохозяйственного предприятия «Завод Сорго»: 1 – Склады № 3–5; 2 – Котельная; 3 – Административный корпус; 4 – Проходная; 5 – Весовая; 6 – Склады № 1–2; 7 – Машинное здание; 8 – ЗТП (недействующая); 9 – Станция пожаротушения; 10 – Сушильно-очистительная башня; 11 – Завальная яма (ГУАР); 12 – ГРП; 13 – Гаражи; 14 – Склады № 6–7; 15 – Маслобойный цех; 16 – Станция ГСМ; 17 – Сторожка; 18 – лаборатория; 19 – КТП 10/0,4 кВ;

20 – Подсобное помещение; 21 – Бытовое помещение; H – высота здания, м; – сооруже-
 жения с железобетонными крышами; – сооружение с шиферными крышами; –
 сооружения с металлическими крышами; \angle – углы скатов крыш сооружений; \rightarrow –
 направление скатов крыш зданий.

Поэтому скаты крыши здания 9 можно отнести к запрещенным приёмным поверхностям для установки фотоэлектрических модулей. Южный скат здания 1, который

ориентирован на юг под углом 15° к горизонту (близкий к оптимальному летнему углу), частично затеняется на 11% в $t = 14^{00}$ зимнего дня в нижней правой части длинного края.

Таблица 1 – Коэффициенты освещенности приёмной поверхности скатов крыш зданий для $t = 14^{00}$ для характерных дней года

№ здания	скат	$K_{осв}, \text{о.е.}$			
		$t=14^{00}$			
		$n=79$	$n=172$	$n=265$	$n=356$
1	южный	1	1	1	0,89
3	восточный	1	1	1	1
	западный	1	1	1	1
6	-	1	1	1	1
9	восточный	0,51	0,51	0	0
	западный	0,51	0,51	0	0
11	восточный	1	1	1	1
	западный	1	1	1	1
22	-	1	1	1	1
23	-	1	1	1	1

Рассмотрим динамику затенения крыш зданий рассматриваемого предприятия в течение летнего дня ($n = 172$ $t = 10^{00}, 12^{00}, 16^{00}, 18^{00}$) с высокой интенсивностью солнечной радиации в период интенсивного производства сельскохозяйственной продукции. Здание №1 и №23 полностью освещены в течение летнего характерного дня.

Для здания №3 и №11, крыши которых ориентированы длинными краями скатов на восток и запад под углом 15° к горизонту, существенное затенение восточного ската

наблюдается в утренние часы (10^{00}) – 80% и 38% площади поверхности соответственно; западного в вечерние часы (18^{00}) – 70% и 58% соответственно. Это обусловлено особенностью пространственной ориентацией ограждающей конструкции крыши. В часы высокой интенсивности солнечной радиации (12^{00} и 16^{00}) коэффициент освещенности приёмной поверхности крыш зданий высокий – $0,84 \dots 0,92$. Более высокое здание №9 в вечернее время (18^{00}) затеняет крышу здание №22 полностью, здания №6 – на 6% .

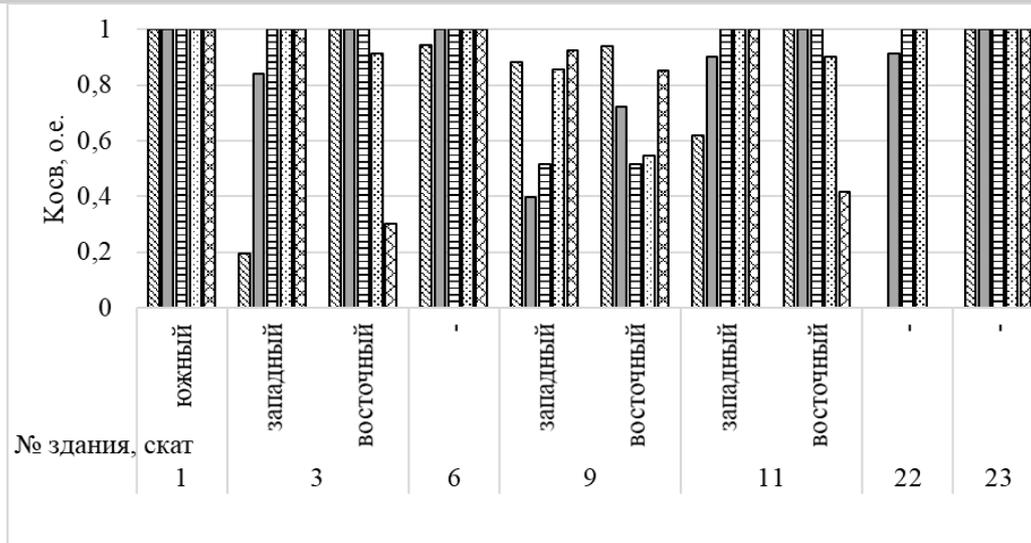


Рис. 2 – Коэффициенты освещенности приёмной поверхности скатов крыш зданий в течение летнего характерного дня: – t = 10 ч; – t = 12 ч; – t = 14 ч; – t = 16 ч; – t = 18 ч.

В виду особенностей конструкционного строения оба ската крыши здания №9 не бывают освещены в течение летнего дня. Ограждающая конструкция затенена на 50...60%, когда Солнце находится в зените (оба ската), в 12⁰⁰ (восточный скат) и в 10⁰⁰ (западный скат). При этом для последних двух моментов времени противоположный скат освещен на 72% и 85% соответственно. В утреннее и вечернее время коэффициент освещенности приёмной поверхности крыши наибольший – от 0,85 до 0,94. Проанализируем изменение коэффициента освещенности приёмной поверхности участка в течение дня с наименьшей интенсивностью проходящей солнечной энергией $n = 356$ (рис. 3): 10⁰⁰, 12⁰⁰, 16⁰⁰.

В зимний характерный день с 10⁰⁰ до 16⁰⁰ полностью освещены здания №6 и № 22, а также восточные скаты зданий №3 и №11. Затенение восточных скатов крыш зданий №3, 9, 11 во время заката (16⁰⁰) составляет от 25% до 70%. Здания № 22 и № 23 в вечернее время полностью затеняют более высокие соседние здания №6 и №9 соответственно. Западные скаты зданий №3, №9, №11 в утреннее время (10⁰⁰) освещены на 55...66%.

Здание № 9 освещено частично по западному скату в 10⁰⁰ на 55%, в 16⁰⁰ – на 78%, по восточному – на 84% и 29% соответственно. И в виду особенностей своей конструкции затенено полностью в 14⁰⁰ и по западному скату в 12⁰⁰.

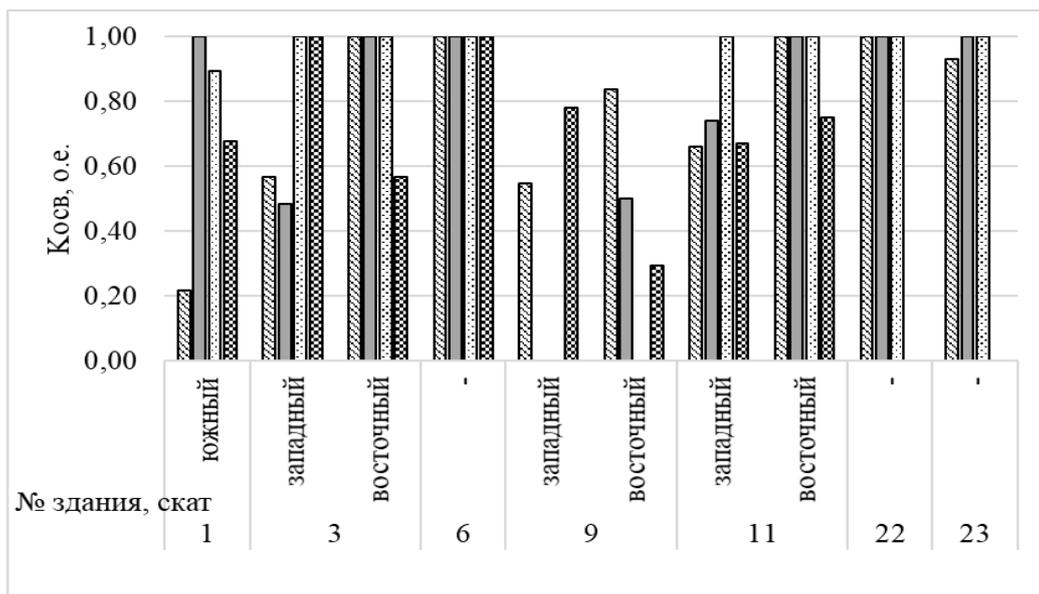


Рис. 3 – Коэффициенты освещенности приёмной поверхности скатов крыш зданий в течение зимнего характерного дня: – t = 10 ч; – t = 12 ч; – t = 14 ч; – t = 16 ч.

В период высокой интенсивности солнечной радиации (с 12⁰⁰ до 16⁰⁰) для осеннего характерного дня полностью освещены здания №1, 6, 22. Здание № 23 и восточные скаты зданий №3 и №11 в 16⁰⁰ затенены на 16...20%. Наибольшее затенение наблюдается в 18⁰⁰ на здании №11 – около 67% из-за отбрасываемой тени более высокого здания №9. В утренние часы с 10⁰⁰ до 12⁰⁰ приемные поверхности западных скатов крыши зданий №3 и №11 освещены соответственно на 70% и 80...90%. На 50% затенены западный скат здания № 9 в 12⁰⁰ и восточный в 16⁰⁰, на 15% – соответственно в 16⁰⁰ и 12⁰⁰, на 6...7% – в 10⁰⁰

и 18⁰⁰, полностью – в 14⁰⁰.

Выделим согласно критериям (3)...(4), какие участки относятся к запрещенным и разрешенным для установки модулей фотоэлектрических систем (рис. 4).

Крыша здания №9 постоянно находится в частичном или полном затенении, здание №22 – под постоянным затенением от соседних более высоких сооружений поэтому их приемные поверхности – запрещенный участок для размещения фотоэлектрических модулей, поскольку не может быть обеспечено эффективное преобразование всей приходящей солнечной энергии.

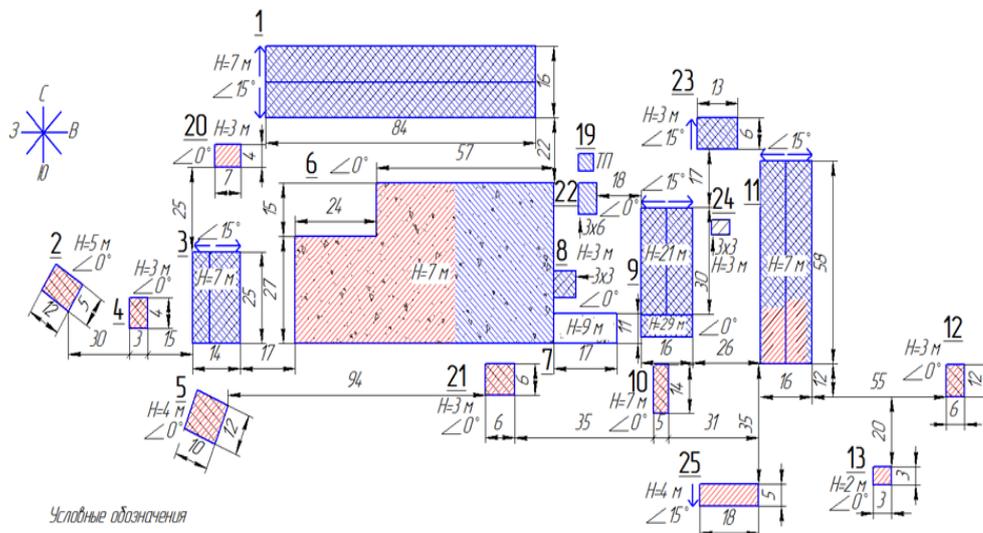


Рис. 4. – План сельскохозяйственного предприятия с нанесением запрещенных и разрешенных участков для установки фотоэлектрических модулей:
 [pink box] – разрешенные участки для размещения фотоэлектрических модулей на основе режима инсоляции территории; [blue box] – запрещенные участки для размещения фотоэлектрических модулей на основе режима инсоляции территории.

Южный скат здания №1 попадает под затенение более чем на 78% утром, на 32% вечером и на 12% в зимний день. Можно рекомендовать при выборе параметров и количества модулей фотоэлектрической системы рассматривать сезонный вариант её функционирования.

Здание №6 характеризуется снижением освещенности приёмной поверхности крыши в утренние часы летнего дня: здесь можно просто исключить этот участок при размещении модулей на ограждающей конструкции. В зимний характерный день в 10⁰⁰ крыша затеняется на 44%, поэтому лучше предусмотреть дополнительные меры по снижению влияния затенения на эффективность функционирования модулей, либо также уменьшить площадь, выделяемую под установку преобразователей солнечной энергии.

В зданиях №3 и 11 необходимо ограничить установку модулей под верхний край крыши на половину площади конструкции вдоль длинного края для исключения затенения их поверхности в утреннее и вечернее время. В зимнее время в 16⁰⁰ крыша здания №11

затеняется соседним зданием №9 примерно на 40% и в осенний день в 18⁰⁰ – на 60%, но уже в другой области, поэтому ее также можно отнести к запрещенным участкам для установки фотоэлектрических модулей.

Каждый скат крыши здания №11 может быть использован только на половину площади либо потребуются дополнительное оборудование для повышения эффективности функционирования модулей в условиях частичного затенения, так как в виду его пространственной ориентации в утреннее и вечернее время каждый скат затеняется на 30...50%.

Таким образом, при площади территории предприятия 55 748 м², из которой под застройку отведено 13,8% – 7 737 м², под установку фотоэлектрических модулей с учетом режима инсоляции территории может быть использовано 2377,5 м² – 30,7% крыш зданий.

Выводы. Разработанный критерий идентификации запрещенных и разрешенных участков территории объекта АПК для установки фотоэлектрических модулей позволяет исключить зоны с неравномерными условиями освещенности. Несмотря на то, что общая

площадь под установку модулей существенно сокращается, на оставшейся территории фотоэлектрическая установка сможет функционировать с максимальной

эффективностью, исключив потери энергии от затенения их поверхности и затраты на дополнительные устройства для снижения таких потерь.

Литература

1. Assouline D., Mohajeri N., Scartezzini J.L. Quantifying rooftop photovoltaic solar energy potential: A machine learning approach // *Sol Energy*. 2017. Vol.141. P. 278 – 296.
2. Quaschnig V., Hanitsch R. Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells // *Sol. Energy*. 1996. Vol. 56. No. 6. P. 513–520.
3. Hanitsch R.E., Schulz D., Siegfried U. Shading effects on output power of grid connected photovoltaic generator systems // *Rev. Energy Ren.: Power Eng*. 2001. P. 93 – 99.
4. Pareek S., Dahiya R. Simulation and performance analysis of individual module to address partial shading cum parameter variation in large photovoltaic fields // *J. Energy Power Sources*. 2015. Vol. 2. No. 3. P. 99–108.
5. Chowdhury S.R., Saha H. Maximum power point tracking of partially shaded solar photovoltaic arrays // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2010. Vol.94. No. 9. P. 1441–1448.
6. Pendem S.R., Mikkili S. Modeling, simulation and performance an PV array configurations (series, series-parallel and honey-comb) to extra power under partial shading conditions // *Energy Reports*. 2018. No. 4. P. 274–287.
7. Topology reconfiguration for optimization of photovoltaic array output / H. Braun, S. Buddha, V. Krishnan, et.al. // *Sustain. Energy, Grids Networks*. 2016. No. 6. P. 58 – 69.
8. Woyte A., Nijs J., Belmans R. Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results // *Solar Energy*. 2003. Vol. 74. P. 217–233.
9. Quaschnig, V., Hanitsch, R., Irradiance calculation on shaded surfaces. // *Solar Energy*. 1998. Vol. 62. P. 369–379.
10. Grid-connected PV buildings: analysis of future scenarios with an example of southern Spain / M. Castro, A. Delgado, F. Argul, et.al. // *Solar Energy*. 2005. Vol. 79. P. 86–95.
11. Estimation of the available rooftop area for installing the rooftop solar photovoltaic (PV) system by analyzing the building shadow using Hillshade analysis / T. Hong, M. Lee, C. Koo, et al. // *Energy Procedia*. 2016. Vol. 88. P. 408 – 413.
12. Bergamasco L., Asinari P. Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Application to Piedmont Region (Italy) // *Solar Energy*. 2011. Vol. 85. P. 2741–2756.
13. Barragán-Escandón A., Zalamea-León E., Terrados-Ceped J. Incidence of Photovoltaics in Cities Based on Indicators of Occupancy and Urban Sustainability // *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 810–819.
14. Даус Ю. В., В Харченко. В., Юдаев И. В. Оценка потенциала солнечной энергии в заданной точке Южного федерального округа // *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612047*, 18.02.2016.

Сведения об авторе:

Даус Юлия Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры физики, e-mail: zirochka2505@gmail.com, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия

ANALYSIS OF THE GEOGRAPHICAL RESOURCE OF SOLAR ENERGY IN THE TERRITORY OF THE AGRICULTURAL OBJECT

Yu. V. Daus

Abstract. One of the tasks of a multifactorial assessment of the solar energy resource in the territory under consideration is to assess the impact of limiting the utilized resource by the building conditions of the location of the environment. When searching for suitable enclosing structures for installing photovoltaic modules, the geometry and spatial orientation of buildings, their relative placement, and shading effects are taken into account. The purpose of the study is to develop a criterion for identifying prohibited and permitted areas of the territory of an agricultural complex for the installation of photovoltaic modules. By eliminating areas with uneven lighting conditions, the photovoltaic installation can operate at maximum efficiency. Prohibited areas for the installation of photovoltaic system modules can be considered those that are shaded during a typical summer day, as well as during the peak intensity of solar radiation on all characteristic days of the year. Permitted areas for the installation of photovoltaic system modules can be considered those that are illuminated during every day of the year. The remaining areas must either be excluded from the installation plan for photovoltaic system modules, or various methods must be used to reduce the impact of module shading on their efficiency (installation of bypass diodes, the use of various module connection schemes, etc.). Using the example of the territory of an existing agricultural processing enterprise, the possibility of installing modules on the roofs of industrial buildings was analyzed, taking into account changes in the illumination of the receiving surface of the building roof slopes for peak intensity during characteristic days of the year. With an area of the enterprise territory of 55,748 m², of which 13.8% - 7,737 m² - is allocated for development, 2,377.5 m², or 30.7% of the roofs of buildings, can be used for the installation of photovoltaic modules, taking into account the insolation conditions of the territory.

Key words: photovoltaic system, insolation regime of the territory, agricultural object, illumination coefficient, prohibited and permitted areas.

References

1. Assouline D, Mohajeri N, Scartezzini JL. Quantifying rooftop photovoltaic solar energy potential: A machine learning approach. *Sol Energy*. 2017; Vol.141. 278-296 p.
2. Quaschnig V, Hanitsch R. Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells. *Sol Energy*. 1996; Vol.56. 6. 513-520 p.
3. Hanitsch RE, Schulz D, Siegfried U. Shading effects on output power of grid connected photovoltaic generator systems. *Rev. Energy Ren.: Power Eng*. 2001; 93-99 p.
4. Pareek S, Dahiya R. Simulation and performance analysis of individual module to address partial shading cum pa-

parameter variation in large photovoltaic fields. *J. Energy Power Sources*. 2015; Vol.2. 3. 99-108 p.

5. Chowdhury SR, Saha H. Maximum power point tracking of partially shaded solar photovoltaic arrays. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2010; Vol.94. 9. 1441-1448 p.

6. Pendem SR, Mikkili S. Modeling, simulation and performance an PV array configurations (series, series-parallel and honey-comb) to extra power under partial shading conditions. *Energy Reports*. 2018; 4. 274-287 p.

7. Braun H, Buddha S, Krishnan V. Topology reconfiguration for optimization of photovoltaic array output. *Sustain. Energy, Grids Networks*. 2016; 6. 58-69 p.

8. Woyte A, Nijs J, Belmans R. Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results. *Solar Energy*. 2003; Vol.74. 217-233 p.

9. Quaschnig V, Hanitsch R. Irradiance calculation on shaded surfaces. *Solar Energy*. 1998; Vol.62. 369-379 p.

10. Castro M, Delgado A, Argul F. Grid-connected PV buildings: analysis of future scenarios with an example of southern Spain. *Solar Energy*. 2005; Vol.79. 86-95 p.

11. Hong T, Lee M, Koo C. Estimation of the available rooftop area for installing the rooftop solar photovoltaic (PV) system by analyzing the building shadow using Hillshade analysis. *Energy Procedia*. 2016; Vol.88. 408-413 p.

12. Bergamasco L, Asinari P. Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Application to Piedmont Region (Italy). *Solar Energy*. 2011; Vol.85. 2741-2756 p.

13. Barragán-Escandón A, Zalamea-León E, Terrados-Ceped J. Incidence of Photovoltaics in Cities Based on Indicators of Occupancy and Urban Sustainability. *Energies*. 2019; Vol.12. 810-819 p.

14. Daus YuV, Kharchenko VV, Yudaev IV. Otsenka potentsiala solnechnoi energii v zadannoi tochke Yuzhnogo federal'nogo okruga. [Assessment of the potential of solar energy at a given point in the Southern Federal District]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2016612047*, 18.02.2016.

Authors:

Daus Yuliya Vladimirovna – Ph.D. of Technical Sciences, associate professor of Physics Department, e-mail: zirochka2505@gmail.com, Kuban State Agrarian University named after I.T.Trubilin, Krasnodar, Russia.