

Анализ эффективности и исследование особенностей конструкций агровольтаических систем в высоких широтах

© Дэн Юаньбяо,¹ Би Цзячэнь,² В.В. Давыдов,^{1,3} Д.С. Проводин,¹ С. Мсукар¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

² Университет науки и технологий МИСИС,
119049 Москва, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197022 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: davydov_vadim66@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 февраля 2026 г.

В окончательной редакции 3 июля 2026 г.

Принято к публикации 10 июля 2026 г.

Рассмотрено моделирование и анализ агровольтаических теплиц с двускатной крышей в Санкт-Петербурге. В рамках исследования были рассмотрены 98 сценариев для изучения уровня внутренней инсоляции, распределения света, выработки энергии и экономической эффективности фотоэлектрических модулей при различных ориентациях конька крыши и углах наклона. При ориентации конька по оси восток-запад угол наклона 40° на обращенном к югу скате обеспечил наивысший показатель выработки электроэнергии на единицу площади солнечной панели. При ориентации конька по оси север-юг комбинация углов наклона $10^\circ/40^\circ$ позволила достичь кратчайшего простого срока окупаемости, составляющего 4.6 года. Теплица с ориентацией по оси север-юг и крутыми углами наклона $70^\circ/70^\circ$ показала максимальную годовую выработку электроэнергии в размере 33332.47 kW·h и наибольшее сокращение выбросов углекислого газа, составившее 6399.83 kg CO₂.

Ключевые слова: агровольтаика, теплицы, моделирование, оптимизация, высокие широты, солнечная радиация.

DOI: 10.61011/JTF.2026.11.63780.26-26

Введение

Рост мирового спроса на продовольствие стимулирует внедрение энергоемких методов ведения сельского хозяйства, таких как тепличное выращивание [1,2]. Регионы высоких широт сталкиваются со специфическими проблемами, где затяжные зимы вызывают необходимость в значительном отоплении и дополнительном освещении для растений. Эта зависимость от используемого топлива для выработки тепла и электрической энергии увеличивает эксплуатационные расходы, и усугубляет „углеродный след“ [3,4]. Интеграция фотоэлектрических систем в конструкции теплиц предлагает устойчивое решение, позволяя одновременно производить продовольствие и возобновляемую энергию [4,5].

Агровольтаика открывает путь к энергетической самодостаточности в условиях холодного климата [6]. Выработанная электроэнергия используется в первую очередь в критически важных системах отопления и освещения, снижая зависимость от внешних сетей. Однако размещение панелей на крыше создает компромисс между выработкой электроэнергии и доступностью солнечной радиации для сельскохозяйственных культур. Фотоэлектрические панели неизбежно блокируют фотосинтетически активную радиацию, необходимую для роста растений [7].

В различных исследованиях рассматривались несколько стратегий для достижения этого баланса. Ученые изучали разные типы теплиц в различных климатических условиях. Параметры оптимизации включали угол наклона фотоэлектрических панелей, коэффициент покрытия фотоэлементами и схемы их размещения для улучшения равномерности освещения. Например, в исследовании Яно [8] оценивалось, как в теплице с ориентацией восток-запад шахматное расположение фотоэлектрических массивов позволяет распределять свет в долгосрочной перспективе более равномерно по сравнению с линейным расположением, при этом лишь незначительно снижая выработку электроэнергии. Для дальнейшей оптимизации производительности были разработаны динамические системы. Наиболее интересный вариант представили Моретти и Маруччи [9,10]. Это инновационный прототип динамической агровольтаической теплицы, которая варьирует затенение путем вращения панелей для оптимизации производства энергии и сельхозпродукции в зависимости от внешних климатических условий. В данной конструкции не была реализована опция с регулировкой наклона панелей и отражающими зеркалами [9,10], что также является инновационным решением (при более высокой стоимости реализации данного проекта). В условиях

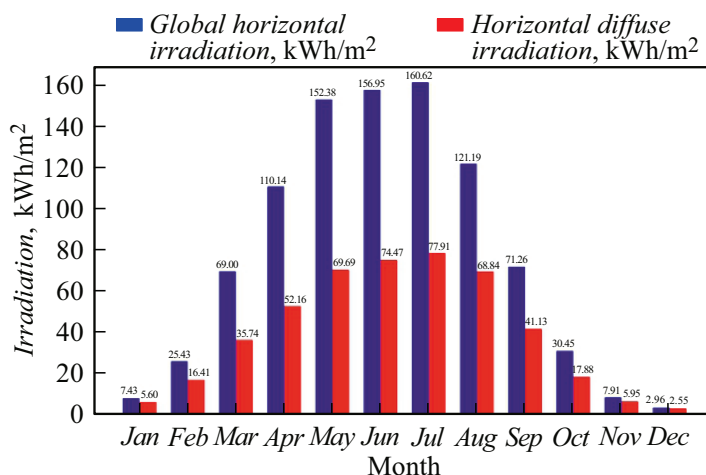


Рис. 1. Суммарная и рассеянная солнечная радиация на горизонтальную поверхность в Санкт-Петербурге (кВт·ч/м²).

Санкт-Петербурга с высокой вероятностью обледенения данные конструкции сложны в эксплуатации.

Поэтому нами было проведено исследование для стационарных вариантов конструкции панелей. В исследовании моделируется ежемесячная выработка электроэнергии, доступность фотосинтетически активной радиации (ФАР) для культур и равномерность распределения света в теплицах с двускатной крышей в Санкт-Петербурге, чтобы удовлетворить острую потребность в адаптированных решениях для северного климата.

1. Расчет выработки фотоэлектрической энергии

Санкт-Петербург расположен на северо-западе России на 59.93° северной широты и 30.3° восточной долготы. Климат региона сочетает в себе черты морского и континентального, со средним максимумом температуры в июле $+22^\circ\text{C}$ и минимумом в январе -10°C (в последние годы эти цифры меняются). Интенсивность солнечной радиации здесь подвержена сильной сезонностью (показатели высоки летом и низки зимой). На рис. 1 представлены суммарная и рассеянная солнечная радиация на горизонтальную поверхность (kWh/m^2) по данным базы PVsyst. Необходимо отметить, что PVsyst является программной платформой, широко признанная инженерами и учеными за высокую точность прогнозирования работы фотоэлектрических систем [11,12]. В Северном полушарии оптимальную эффективность обеспечивают панели, ориентированные на юг на односкатных крышах. Однако агротехнические требования диктуют необходимость разреженного размещения модулей для равномерного освещения растений.

В исследовании рассматриваются теплицы с двускатной крышей с ориентацией конька восток-запад или север-юг. Модули размещаются асимметрично на обоих скатах с коэффициентом покрытия 25 %. Такой уровень

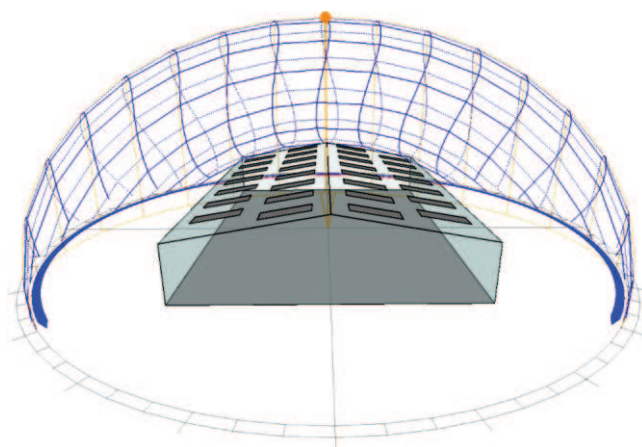


Рис. 2. Модель агровольтаической теплицы.

покрытия (20 %–25 %) оказывает минимальное влияние на культуры, сохраняя внутри теплицы 80 % необходимой для фотосинтеза радиации [13–15].

На рис. 2 показана 3D-модель теплицы ($20 \times 15 \times 3 \text{ m}$) и траектория движения Солнца, созданная в Autodesk Ecotect Analysis. Для обеспечения точности расчетов моделирование выработки электрической энергии выполнялось в PVsyst. Использовались локальные метеоданные (радиация, температура, ветер), а альbedo поверхности земли принято равным 0.2. Расчет выработки энергии (E) осуществлялся с использованием следующего соотношения [16]:

$$E_{pv} = G_{pv} \cdot \tau_g \cdot \eta_r \cdot [1 - \alpha_\eta \cdot (T_{pv} - T_a)], \quad (1)$$

где переменная G_{pv} обозначает интенсивность излучения на поверхности модулей, α_η — температурный коэффициент изменения КПД ($0.0045^\circ\text{C}^{-1}$), τ_g — коэффициент пропускания стекла, η_r — КПД преобразования при стандартных условиях (23.2 %), T_{pv} — температура поверхности панели, T_a — температура окружающей

среды. В исследовании анализируется выработка энергии на крышах с разной ориентацией и углами наклона. Следует отметить, что изменение угла наклона крыши варьирует доступную для монтажа площадь, что, наряду с эффективностью модулей (23.2%), напрямую определяет общую производительность системы.

На рис. 3 представлена годовая выработка энергии для теплицы с ориентацией конька по оси восток-запад. Выработка возрастает по мере увеличения углов наклона как на северном (β), так и на южном (α) скатах. Максимальная производительность системы составляет 30168.18 kW·h за год при угле наклона обоих скатов 70°.

На рис. 4 отражены результаты для ориентации конька по оси север-юг. Пиковое значение суммарной выработки энергии достигает 33332.47 kW·h за год при углах наклона восточного (α) и западного (β) скатов, равных 70°. Данная оптимальная конфигурация превосходит вариант с ориентацией восток-запад приблизительно на 10.5%. Ориентация конька оказывает значительное влияние на общую производительность электрической энергии конструкций с большими углами наклона.

Увеличение площади поверхности крыши способствует росту общей выработки системы, несмотря на снижение инсоляции на единицу площади при крутых углах наклона. В табл. 1 приведен анализ годовой солнечной радиации на единицу площади для оценки удельной эффективности модулей, размещенных на скатах теплицы, ориентированных в различных направлениях с различными углами наклона. Панели, ориентированные на юг, достигают максимального показателя инсоляции 223.92 kW·h/m²/year при угле наклона 40°. Эффективность панелей северной ориентации снижается с увеличением угла наклона, тогда как панели восточной и западной ориентации демонстрируют наилучшие показатели при малых углах наклона.

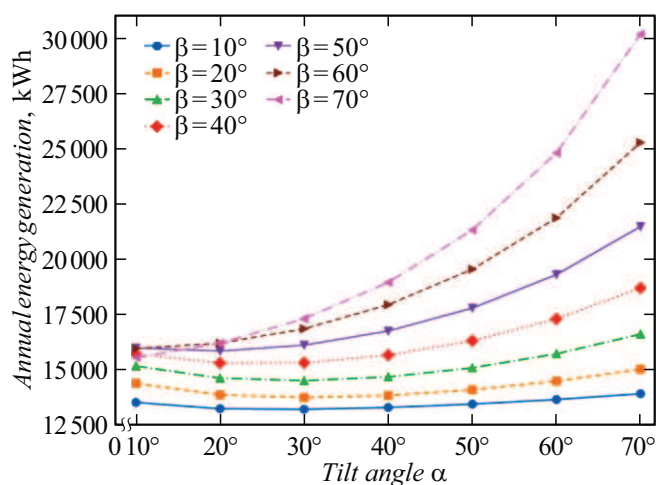


Рис. 3. Расчетная годовая выработка энергии (kW·h/year) теплицы с ориентацией конька восток-запад при различных углах наклона крыши (α — угол наклона южного ската, β — северного ската). Углы α и β отсчитываются от горизонтальной плоскости.

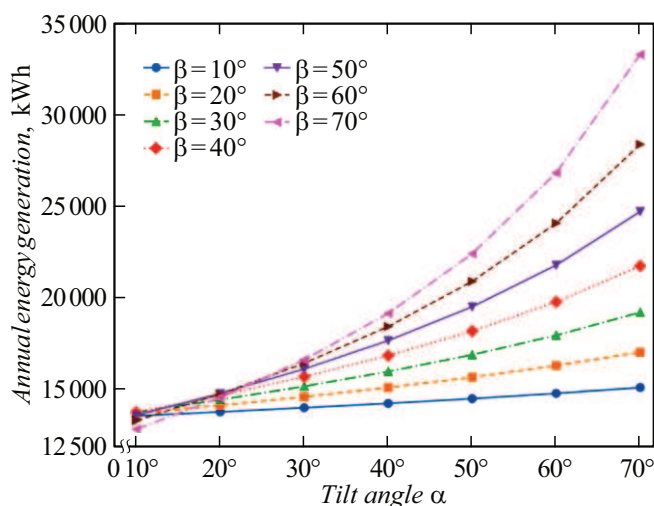


Рис. 4. Расчетная годовая выработка энергии (kW·h/year) теплицы с ориентацией конька север-юг при различных углах наклона крыши (α — угол наклона восточного ската, β — западного ската). Углы отсчитываются от горизонтальной плоскости.

2. Моделирование распределения света

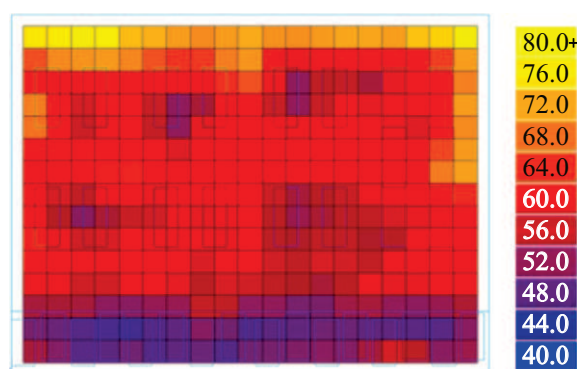
Для оценки внутреннего распределения света и равномерности излучения в условиях наихудшего сценария (типичный пасмурный зимний день) проводилось моделирование с использованием программного комплекса Autodesk Ecotect Analysis. Ввиду высокой трудоемкости анализа светораспределения в течение полного дня в агровольтаических теплицах, в качестве расчетного случая для исследования был выбран именно наихудший сценарий — типичный пасмурный зимний день [17].

В разд. 2 оцениваются две различные конфигурации теплицы (рис. 5). Вариант 1 (рис. 5, а) представляет собой теплицу с ориентацией конька по оси восток-запад, углами наклона южного ската $\alpha = 40^\circ$ и северного ската $\beta = 10^\circ$. Вариант 2 (рис. 5, б) использует ориентацию конька по оси север-юг с углами наклона восточного ската α и западного ската β , равными 10° .

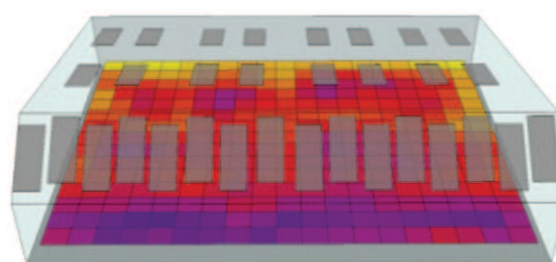
На рис. 5 представлены результаты моделирования светового поля в теплицах. Вариант 1 демонстрирует более высокую общую интенсивность света внутри помещения, но при этом возникают отчетливые светлые и темные зоны. Асимметричная компоновка приводит к концентрированному затенению непосредственно под модулями на южном скате, что снижает равномерность освещения. Вариант 2 показывает более низкую общую интенсивность, однако достигает лучшей равномерности распределения. Тени под панелями распределены равномерно, а не сконцентрированы в конкретных областях.

Таблица 1. Солнечная радиация, поступающая на фотоэлектрические панели при различных углах наклона и ориентации ($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2/\text{year}$). Угол наклона φ ската отсчитывается от горизонтальной плоскости. Обозначения South, North, East и West соответствуют южному, северному, восточному и западному скатам крыши теплицы

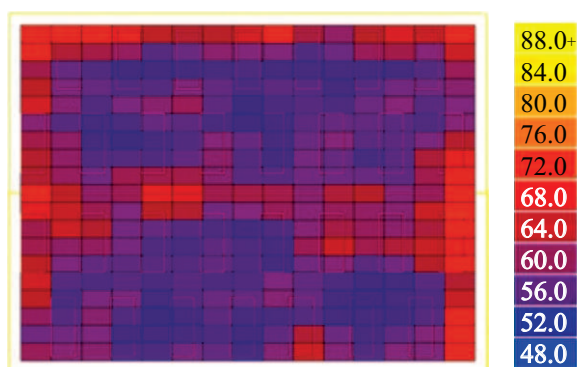
φ	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°
South	197.25	204.92	211.42	216.46	220.24	222.66	223.92	223.81	222.45	219.82	215.94	210.69	204.29
North	158.20	147.39	136.37	125.55	115.06	105.29	96.26	88.60	82.62	78.52	75.69	73.22	70.86
East	178.25	177.83	177.20	176.47	175.42	174.05	172.27	169.96	167.33	164.18	160.41	156.21	151.48
West	178.57	178.15	177.62	176.78	175.63	174.26	172.58	170.38	167.75	164.71	161.14	157.15	152.53



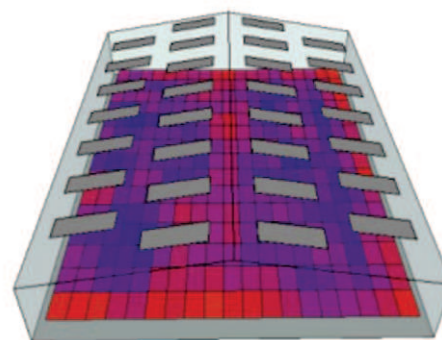
Average value of daylight factor: 59.27



a



Average value of daylight factor: 58.58



b

Рис. 5. Распределение света в теплицах с различной ориентацией ее конька: *a* — ориентация конька восток-запад, $\alpha = 40^\circ$ (южный скат), $\beta = 10^\circ$ (северный скат); *b* — ориентация конька север-юг, $\alpha = 10^\circ$ (восточный скат), $\beta = 10^\circ$ (западный скат). Углы отсчитываются от горизонтальной плоскости.

3. Экономическая и экологическая оценка

В исследовании анализируется выработка фотоэлектрической энергии на крышах с различной ориентацией конька и углами наклона. Используется стандартное значение КПД фотоэлектрических модулей (порядка 23.2%), которые рассматриваются в моделировании. Важно отметить, что изменение угла наклона крыши приводит к изменению площади поверхности, а площадь поверхности напрямую влияет на объем выработки электроэнергии фотоэлектрической системой.

Оценка экономической целесообразности и экологических преимуществ основывается на общих затратах по проекту, финансовой экономии, сроке окупаемости инвестиций и сокращении выбросов (CB, ER (emission reduction)). Предложенный нами анализ выделяет дополнительные расходы на интеграцию фотоэлектрических систем из базовой стоимости строительства теплицы. Уравнения (3)–(5) количественно определяют эти показатели [18]:

$$S_{\text{annual}} = E_{\text{gen}} \cdot C_{\text{tariff}}, \quad (2)$$

$$SBR = C_{\text{inv}} / S_{\text{annual}}, \quad (3)$$

Таблица 2. Срок окупаемости теплицы с ориентацией конька восток-запад (год). В таблице: α — угол наклона южного ската, β — северного ската. Углы α и β отсчитываются от горизонтальной плоскости

β	α						
	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
10°	5.09	5.28	5.38	5.43	5.47	5.49	5.51
20°	4.86	5.20	5.42	5.57	5.67	5.74	5.79
30°	4.69	5.10	5.40	5.62	5.78	5.89	5.97
40°	4.60	5.04	5.38	5.65	5.86	6.01	6.11
50°	4.60	5.05	5.41	5.70	5.93	6.10	6.22
60°	4.70	5.13	5.50	5.79	6.03	6.21	6.33
70°	4.93	5.36	5.73	6.03	6.27	6.45	6.58

Таблица 3. Срок окупаемости теплицы с ориентацией конька север-юг (год). В таблице: α — угол наклона восточного ската, β — западного ската. Углы α и β отсчитываются от горизонтальной плоскости

β	α						
	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
10°	5.07	5.07	5.07	5.07	5.07	5.07	5.07
20°	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
30°	5.16	5.16	5.16	5.15	5.15	5.15	5.15
40°	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25
50°	5.41	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
60°	5.64	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63
70°	5.97	5.96	5.96	5.96	5.96	5.95	5.95

$$ER = E_{sub} \cdot F_{carbon}. \quad (4)$$

Годовая экономия S_{annual} рассчитывается с использованием средней выработки E_{gen} и местного промышленного тарифа C_{tariff} на электроэнергию, который составляет 10.28 rub/kW·h. Простой срок окупаемости (ПСО, SBP (simple payback period)) определяется делением первоначальных инвестиций C_{inv} на годовую экономию. Дополнительно рассматривается СВ (сокращение выбросов) как произведение замещенной электроэнергии E_{sub} и регионального коэффициента углеродоемкости сети F_{carbon} , зафиксированного на уровне 0.192 kg/kW·h для Санкт-Петербурга. Для оценки и сравнения экономической эффективности предлагаемых проектов был рассчитан ПСО как для ориентации конька восток-запад (табл. 2), так и север-юг (табл. 3) при различных матрицах углов наклона. Результаты показывают, что все смоделированные конфигурации для обеих ориентаций

экономически жизнеспособны, а сроки окупаемости находятся значительно ниже 15-летнего проектного порога.

Сравнительный анализ показывает, что ориентация конька север-юг обеспечивает лучшие показатели экономической эффективности, достигая глобального минимума ПСО в 4.60 года при асимметричной комбинации наклонов. Это быстрее, чем лучший сценарий для ориентации восток-запад, где минимальный ПСО составил 5.07 года (как правило, в конфигурациях, включающих, по крайней мере, один скат с малым углом наклона 10°). Несмотря на достижение наилучшего общего результата, ориентация север-юг также демонстрирует большую вариативность экономических показателей: сроки окупаемости варьируются от 4.60 до 6.58 года. В отличие от этого ориентация восток-запад обеспечивает более стабильный и последовательный инвестиционный профиль с гораздо более узким диапазоном ПСО: от 5.07 до 5.97 года. Это указывает на явный компромисс: ориентация север-юг обладает потенциалом для получения наивысшей экономической отдачи (особенно при специфических асимметричных конструкциях), в то время как ориентация восток-запад предлагает более предсказуемый и менее изменчивый, хотя и несколько более низкий возврат инвестиций.

Годовое СВ является критически важной метрикой для оценки экологических преимуществ „агровольтаических“ теплиц. Данные по годовому СВ для ориентаций восток-запад (табл. 4) и север-юг (табл. 5) представлены на основе расчета общей выработки энергии каждой конфигурации и регионального коэффициента выбросов сети для различных углов наклона скатов.

Анализ показывает, что ориентация конька север-юг обладает более высоким потенциалом для снижения выбросов углерода. Данная конфигурация достигает максимального годового показателя СВ в 6399.83 (kg CO₂)/year, когда оба ската (восточный и западный) установлены под углом 70°. Для сравнения ориентация конька восток-запад дает меньшее, но все же значительное пиковое сокращение в 5792.29 (kg CO₂)/year, которое также достигается при комбинации наклонов 70°/70°.

Более крутые углы наклона последовательно приводят к большему сокращению выбросов в обеих конструкциях. Эта тенденция напрямую коррелирует с данными по общей выработке энергии, поскольку более высокий выход электроэнергии замещает больше энергии из сети. Проекты, использующие крутые углы крыши, максимизируют вклад в защиту окружающей среды за счет снижения углеродного следа. Ориентация север-юг оказывается наиболее эффективным вариантом для снижения CO₂ благодаря более высокой суммарной выработке электроэнергии.

Таблица 4. Годовое сокращение выбросов CO₂ теплицы с ориентацией конька восток-запад (kg CO₂/year). В таблице: α — угол наклона южного ската, β — северного ската. Углы α и β отсчитываются от горизонтальной плоскости

β	α						
	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
10°	2598.7	2544.7	2539.3	2555.4	2584.6	2624.3	2674.5
20°	2764.5	2664.7	2641	2659.8	2708.9	2784.2	2886.5
30°	2914.5	2809.7	2787.6	2820.8	2899	3020.6	3191.1
40°	3019.8	2940.7	2943.2	3009.3	3134.4	3323.5	3591.8
50°	3072	3044.3	3095.7	3218.6	3417.1	3707.8	4124.4
60°	3067.1	3113	3237.9	3445.8	3754.2	4199.4	4852.3
70°	2986.9	3113.3	3325	3639.7	4094.6	4762.1	5792.2

Таблица 5. Годовое сокращение выбросов CO₂ теплицы с ориентацией конька север-юг (kg CO₂/year). В таблице: α — угол наклона восточного ската, β — западного ската. Углы α и β отсчитываются от горизонтальной плоскости

β	α						
	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
10°	2608.7	2650.3	2693.6	2739.5	2789.2	2844.1	2906.2
20°	2633.7	2718.6	2808.7	2906.1	3013.8	3135.4	3276.2
30°	2648.1	2777.9	2918.5	3074	3249.7	3453.2	3695.7
40°	2644.8	2822.7	3019.2	3241.2	3498.2	3804.5	4182
50°	2615.7	2843.4	3100.7	3398.5	3753.3	4190.5	4752.4
60°	2557.6	2837.1	3160.6	3545.8	4020.4	4630.3	5457.7
70°	2468.6	2800.9	3196.5	3683.7	4309.7	5158.8	6399.8

Заключение

Проведенные исследования позволили определить оптимальные параметры конструкций „агровольтаических“ теплиц по размещению солнечных панелей для регионов высоких широт на основе баланса между производством энергии и потребностями сельскохозяйственных культур.

Увеличение до максимального значения общей выработки электроэнергии и оптимизация эффективности на единицу площади представляют собой различные стратегии проектирования. Наклон 40° на южном скате крыши с ориентацией конька восток-запад обеспечивает пиковую эффективность приема излучения. При этом ориентация конька север-юг с крутыми углами наклона 70° позволяет достичь наивысшей годовой выработки в 33332.47 kW·h и показателя СВ в 6399.83 kg CO₂ за счет увеличенной площади установки фотоэлектрических модулей.

Финансовый анализ показывает, что экономическая отдача не всегда строго коррелирует с максимальной

выработкой энергии. Ориентация север-юг с комбинацией углов наклона 10° и 40° обеспечивает кратчайший ПСО, составляющий 4.60 года. Инвесторам необходимо расставлять приоритеты между минимизацией времени возврата первоначальных вложений и максимизацией общей долгосрочной выработки энергии.

Анализ световой среды выявляет компромисс между интенсивностью и равномерностью освещения. Ориентация восток-запад обеспечивает более высокую общую внутреннюю интенсивность, но приводит к неравномерному распределению света. Ориентация север-юг гарантирует лучшую равномерность, необходимую для роста культур, несмотря на более низкую общую освещенность. Полученные результаты формируют принципы проектирования „агровольтаических“ теплиц для развития устойчивого сельского хозяйства с контролируемой средой в условиях холодного климата.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] FAO. *Early Warning Early Action report on food security and agriculture* <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca4132en>.
- [2] N.R. Kostik, S.A. Tarasov, A.V. Bobyl, E.I. Terukov. Iop Conference Series Earth and Environmental Science, **1096** (1), 012031 (2022). DOI: 10.1088/1755-1315/1096/1/012031
- [3] G.K. Ntinas, D. Dannehl, I. Schuch, T. Rocks, U. Schmidt. Biosyst. Eng., **189**, 164 (2020). DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.11.011
- [4] A. Bobyl, G. Konoplev, S. Tarasov, N. Kostik, U. Onah. Intern. J. Energy Water Resources, **9** (4), 1861 (2025). DOI: 10.1007/s42108-024-00334-8
- [5] W. Jiang, Z. Ju, H. Tian, Y. Liu, M. Arıcı, X. Tang, Q. Li, D. Li, H. Qi. J. Clean. Prod., **360**, 132198 (2022). DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132198
- [6] В.В. Шпейзман, В.И. Николаев, А.О. Поздняков, А.В. Бобыль, Р.Б. Тимашов, А.И. Аверкин, С.Е. Никитин, О.И. Коньков, Г.Г. Шелопин, Е.И. Теруков, А.В. Нащекин. ЖТФ, **90** (7), 1168 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49452.380-19. [V.V. Shpeizman, V.I. Nikolaev, A.O. Pozdnyakov, A.V. Bobyl', R.B. Timashov, A.I. Averkin, S.E. Nikitin, O.I. Kon'kov, G.G. Shelopin, E.I. Terukov, A.V. Nashchekin. Tech. Phys., **65** (7), 1123 (2020). OI: 10.1134/S1063784220070191]
- [7] S. Parajuli, T.N. Bhattarai, S. Gorjian, M. Vithanage, S.R. Paudel. Appl. Energy, **344**, 121270 (2023). DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121270
- [8] A. Marucci, D. Monarca, A. Colantoni, E. Campiglia, A. Cappuccini. J. Agric. Eng., **48** (3), 154 (2017). DOI: 10.4081/jae.2017.628
- [9] A. Yano, M. Kadowaki, A. Furue, N. Tamaki, T. Tanaka, E. Hiraki, Y. Kato, F. Ishizu, S. Noda. Biosyst. Eng., **106** (4), 367 (2010). DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2010.04.007
- [10] S. Moretti, A. Marucci. Energies, **12** (13), 2589 (2019). DOI: 10.3390/en12132589
- [11] P. Yadav, N. Kumar, S.S. Chandel. Int. Conf. Comput. Power, Energy, Inf. Commun. (ICCPEIC), 0358 (2015).
- [12] Y. Deng, V.V. Davydov. St. Petersburg Polytech. Univ. J. Phys. Math., **76** (3.2), 256 (2024).
- [13] C.J. Torrente, J. Reca, R. L'opez-Luque, J. Martínez, F.J. Casares. Appl. Energy, **353**, 122050 (2024). DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.122050
- [14] F.M.S. Al-Shamiry, A.R.M.S. Desa Ahmad, I. Aris, R. Janius, R. Kamaruddin. Am. J. Appl. Sci., **4** (6), 386 (2007). DOI: 10.3844/ajassp.2007.386.389
- [15] G. Minuto, C. Bruzzone, F. Tinivella, D. Gómez, A. Minuto. Suppl L'Inform Agrario, **10**, 16 (2009).
- [16] N. Islam, K. Irshad, M.H. Zahir, S. Islam. Energy, **218**, 119542 (2021). DOI: 10.1016/j.energy.2021.119542
- [17] A. Marucci, D. Monarca, M. Cecchini, A. Colantoni, A. Cappuccini. J. Agric. Eng., **46** (4), 144 (2015). DOI: 10.4081/jae.2015.459
- [18] D. Li, Y. Wu, G. Zhang, M. Arıcı, C. Liu, F. Wang. Appl. Energy, **222**, 343 (2018). DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.04.003