

Оригинальная статья

УДК 633.631.559.07(574)

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-66-71



## РАСЧЕТ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОЙ РАДИАЦИИ В УСЛОВИЯХ КАЗАХСТАНА

**Безбородов Юрий Германович**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, доцент

AuthorID: 271273, ORCIDID: 0000-0001-5293-2342; ubezborodov@rgau-msha.ru

**Хожанов Ниембай Нуржанович**<sup>2</sup>, канд. с.-х. наук, доцент

AuthorID: 467105, ORCIDID: 0000-0002-0859-4259; khozhanov55@mail.ru

**Дудаков Николай Константинович**<sup>1</sup>, канд. с.-х. наук, доцент

AuthorID: 1094205, ORCIDID:0000-0001-9306-9602; ndudakov@rgau-msha.ru

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

<sup>2</sup> ТОО «Казахский Научно-исследовательский институт водного хозяйства»; 080003, Республика Казахстан, г. Тараз, ул. К. Койгельды, 12.

**Аннотация.** Объектом исследований являются агроценозы Жамбылской области Республики Казахстан. Исследования проводились с целью совершенствования методики оценки воздействия солнечных энергетических ресурсов на рост и развитие сельскохозяйственных культур. В задачи исследований входили: моделирование продукционного процесса, сопровождающего формирование урожая; прогноз возможных урожаев в различных климатических условиях и возможностей оптимизации процесса формирования урожая; разработка методики определения урожайности биомассы кукурузы в зависимости от величины фотосинтетически активной радиации (ФАР). Проведенные исследования показали, что предлагаемая методика определения биомассы сельскохозяйственных культур позволяет без дополнительного оборудования получить локальную информацию о поступлении солнечной энергии как основы для фотосинтеза. Опытные данные расчета биомассы кукурузы при выращивании на силос способствовали получению урожайности в 542-634 ц/га. Урожайность сухой биомассы находится в пределах 101,2-154,5 ц/га, что является близким к индексу использования ФАР – 55-84%.

**Ключевые слова:** фотосинтетически активная радиация, коэффициент теплообеспеченности сельскохозяйственных культур, коэффициент энергетической эффективности, коэффициент солнечной радиации, высота растений

**Формат цитирования:** Безбородов Ю.Г., Хожанов Н.Н., Дудаков Н.К. Расчет фотосинтетически активной радиации в условиях Казахстана // Природообустройство. 2023. № 3. С. 66-71. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-66-71.

© Безбородов Ю.Г., Хожанов Н.Н., Дудаков Н.К., 2023

Original article

## CALCULATION OF PHOTOSYNTHETIC ACTIVE RADIATION IN THE CONDITIONS OF KAZAKHSTAN

**Bezborodov Yuri Germanovich**<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

AuthorID: 271273, ORCID ID: 0000-0001-5293-2342; ubezborodov@rgau-msha.ru

**Khozhanov Nietbai Nurzhanovich**<sup>2</sup>, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

AuthorID: 467105, ORCID: 0000-0002-0859-4259; khozhanov55@mail.ru

**Dudakov Nikolay Konstantinovich**<sup>1</sup>, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

AuthorID: 1094205, ORCID ID:0000-0001-9306-9602; ndudakov@rgau-msha.ru

<sup>1</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; 49 Timiryazevskaya str., Moscow, 127434, Russia

<sup>2</sup> TOO “Kazakh Scientific Research Institute of Water Management”; 080003, Republic of Kazakhstan, Taraz, K. Koigeldy str., 12.

**Annotation.** The object of the research is agrocenosis of the Zhambyl region of the Republic of Kazakhstan. The studies were carried out with the purpose of improving the method of assessment of impact of solar energetic resources on the growth and development of agricultural crops. The aims of the investigations included: modeling of the production process forming the harvest;

forecast of possible yields in different climatic conditions and possibilities of optimization of the formation process of the yield; development of the method of determination of productivity of biomass corn crop depending on the value of photosynthetically active radiation (PAR). The fulfilled studies showed that the proposed method of determination of the biomass of agricultural crops allows obtaining without additional equipment local information on the receiving solar energy as a basis for photosynthesis. The experimental data of calculation of the corn biomass when growing on silo promoted to the yield of 542-634 clha. The dry biomass productivity is in the range of 101.2-154.5 clha, which is close to the index of usage PAR – 55-84%.

**Keywords:** photosynthetically active radiation, coefficient of heat supply of agricultural crops, coefficient of energetic efficiency, coefficient of solar radiation, height of plants

**Format of citation:** Bezborodov Yu.G., Khozhanov N.N., Dudakov N.K. Calculation of photosynthetic active radiation in the conditions of Kazakhstan // Prirodoobustrojstvo. 2023. № 3. P. 66-71. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-66-71.

**Введение.** Определить эффективность технологий возделывания в обычных денежных показателях довольно сложно, так как цены на технику, семена и удобрения являются нестабильными. Более точная оценка эффективности технологии производится по энергозатратам [1]. Энергетические затраты в процессе производства растениеводческой продукции связаны с компонентами технологии: семенами, механизмами и др.

По затратам энергии на производство кормов можно дать оценку эффективности технологии их выращивания и заготовки. Такая оценка выращивания кормовых культур производится на основе анализа технологической карты, так как она является отправной точкой для оптимизации технологии и выявления резервов. Общие энергетические затраты рассчитываются по всем мероприятиям, указанным в технологической карте.

Причиной низкой рентабельности растениеводства могут быть, в том числе, сверхнормативные затраты на возделывание сельскохозяйственных культур, обусловленные низкой технической вооруженностью, устаревшей, низкопроизводительной технологией и использованием высокоэнергоёмких технологических средств. В современных условиях ресурсосбережение и конкурентоспособность производства являются важнейшими факторами экономической эффективности.

В традиционном земледелии максимальные затраты энергии связаны с перемещением сельскохозяйственных машин и механизмов: например, при посеве эффективность использования энергии двигателя снижается до 60%. С другой стороны, для повышения энергоотдачи можно совмещать несколько операций, что приводит к снижению расхода горюче-смазочных материалов на 20-30%.

При анализе структуры себестоимости продукции растениеводства видим, что значительная доля энергозатрат относится к агротехническим мероприятиям, поэтому их снижение связано с модернизацией технологии возделывания [2].

Внедрение научно обоснованных структур пахотных земель и севооборотов, строгое соблюдение сроков и последовательности выполнения агротехнических мероприятий, устранение потерь урожая и использование продуктивных сортов являются самыми доступными способами повышения энергетической эффективности продукции [3]. Отсюда значение энергетических ресурсов в процессах осуществления технологических операций является существенным. Поэтому в данных исследованиях попытались изучить основные факторы формирования фотосинтетически активной радиации (ФАР) на региональном уровне территории Республики Казахстан.

**Материалы и методы исследований.** Целью исследований явилось совершенствование методики оценки воздействия энергетических ресурсов на рост и развитие сельскохозяйственных культур.

При проведении исследований использован сопряженный и системный анализ, а результаты обрабатывались методами математической статистики.

Исходя из цели исследований их задачами явились:

- моделирование продукционного процесса, сопровождающего формирование урожая;
- прогноз возможных урожаев в различных климатических условиях и возможностей оптимизации процесса формирования урожая;
- разработка методики определения фотосинтетически активной радиации (ФАР).

**Результаты и их обсуждение.** В настоящее время для установления причин различной

урожайности сельскохозяйственных культур в агрометеорологии используется физиолого-метеорологический метод, с помощью которого оценивается влияние энергии фотосинтетически активной радиации (ФАР) на процессы фотосинтеза, транспирации и теплообмена [4].

Проведенными исследованиями установлено, что коэффициент теплообеспеченности орошаемых сельскохозяйственных культур Жамбылской области дает возможность корректировать технологию возделывания сельскохозяйственных культур:

$$k_i = \frac{\sum t > 10^{\circ}\text{C}}{\sum t_{\text{активных}}} \quad (1)$$

По результатам расчетов (табл. 1) проведено зонирование территории по уровню комфортности климатических условий для ведения земледелия. Произведенная группировка интервалов коэффициента теплообеспеченности сельскохозяйственных культур позволила выделить 4 зоны:

$k_i = 0,98-2,02$  – зона очень умеренного земледелия;

$k_i = 2,03-2,50$  – зона умеренного земледелия;

$k_i = 2,51-3,50$  – зона благоприятного земледелия;

$k_i > 3,51$  – зона очень благоприятного земледелия.

Для условий Жамбылской области с помощью коэффициента энергетической эффективности  $k_э$  определено использование энергетических ресурсов сельскохозяйственными культурами (табл. 2):

$$k_э = \frac{R_H}{k_i},$$

где  $R_H$  – радиационный индекс абсолютной отметки местности, Дж/м сек.;  $k_i$  – коэффициент теплообеспеченности, безразмерная величина.

Анализ табличных данных показывает, что доля использования энергетических ресурсов при возделывании сельскохозяйственных культур, определяемая по коэффициенту теплообеспеченности в привязке к метеорологическим станциям, падает. Такая закономерность дает основание считать гипотезу о повышении потребления энергоресурсов сельскохозяйственных культур при их возделывании по коэффициенту теплообеспеченности верной. Установленная закономерность показывает недостатки в использовании земельно-водных и энергетических ресурсов в системе земледелия Жамбылской области и, кроме того, указывает на географический характер обеспеченности энергетическими ресурсами. Снижение коэффициента теплообеспеченности происходит в юго-западном направлении по территории области [5].

**Таблица 1. Распределение территории Жамбылской области (по метеостанциям) по уровню комфортности климата для ведения земледелия с учетом коэффициента теплообеспеченности сельскохозяйственных культур  $k_i$ , %**

**Table 1. Distribution of the territory of the Zhambyl region (by weather stations) by the level of climate comfort for agriculture performing, taking into account the coefficient of heat supply of agricultural crops  $k_i$ , %**

Метеостанции Weather stations	Коэффициенты теплообеспеченности / Coefficient of heat supply			
	0,98-2,02	2,03-2,50	2,51-3,50	3,51
Акыртобе	21,07	15,76	47,39	15,78
Тараз	21,09	31,58	31,57	15,76
Кордай	36,88	47,37	5,26	10,59
Жуалы	52,66	31,59	10,58	5,27

**Таблица 2. Расчет коэффициента энергетической эффективности  $k_э$  сельскохозяйственных культур в Жамбылской области**

**Table 2. Calculation of the coefficient of energy efficiency  $k_э$  of agricultural crops in Zhambyl region**

Культура Crop	Метеорологические станции / Weather station					
	Кордай	Акыртобе	Кулан	Тараз	Мерке	Жуалы
Яровая пшеница / Spring wheat	0,13	0,10	0,12	0,10	0,06	0,08
Картофель / Potatoes	0,11	0,08	0,09	0,08	0,05	0,06
Сахарная свекла / Sugar beet	0,25	0,18	0,22	0,19	0,13	0,15
Кукуруза на зерно / Corn on grain	0,23	0,16	0,20	0,17	0,11	0,13
Кукуруза на силос / Corn on silage	0,20	0,15	0,18	0,16	0,10	0,12
Люцерна / Alfalfa	0,07	0,05	0,06	0,05	0,03	0,04

Из данных таблицы 2 следует, что использование энергии сельскохозяйственными культурами, выращиваемыми в Жамбылской области, изменяется от 3,0 до 25%. Максимальное использование энергетических ресурсов отмечается у сахарной свеклы, а минимальное – у люцерны.

Одним из важнейших параметров для прогноза продуктивности агроландшафтов является коэффициент увлажнения – отношение годового количества осадков к испаряемости [7].

Под продуктивностью (урожайностью) агроландшафта нами понимается продукция, поставляемая агроценозам (полями, садами и т.д.) и являющаяся критерием оптимальности его структуры. Нами выявлена связь коэффициента увлажнения  $k_y$  с радиационным индексом абсолютной отметки местности  $R_n$ , которая коррелируется как

$$k_y = 0,281R_n + 0,098. \quad (2)$$

Отсюда, подставляя вместо  $k_y = O_c/E_o$  и  $R_n = R/H$ , где  $O_c$  – годовая сумма осадков, мм;  $E_o$  – суммарное испарение за год, мм;  $R_n$  – радиационный индекс абсолютной отметки местности, Дж/м сек.;  $R$  – радиационный баланс, Дж/м<sup>2</sup> сек.;  $H$  – абсолютная высота местности, м, после преобразования получили коэффициент

солнечной радиации, характеризующий ослабление солнечной энергии:

$$K_R = \frac{RE_o}{O_c H}. \quad (3)$$

Поставленная цель достигается тем, что первоначально устанавливается  $Q_{\text{ФАР}}$  (приход ФАР за период вегетации культуры) по предлагаемой формуле, представленной в таблице 3:

$$Q_{\text{ФАР}} = K_R h_p, \quad (4)$$

где:  $Q_{\text{ФАР}}$  – приход ФАР за период вегетации культуры, ккал/га мин;  $K_R$  – коэффициент солнечной радиации, Дж/м<sup>3</sup> сек.;  $h_p$  – высота растений, м.

Далее, по приходу ФАР в любой период развития сельскохозяйственной культуры, можно определить биомассу как сухой, так и зеленой массы исследуемой культуры, в зависимости от высоты развития растений (табл. 4), по формуле, предложенной М.К. Каюмовым [6]:

$$Y_{\text{биол}} = \frac{Q_{\text{ФАР}} K_{\text{ФАР}}}{100q}, \quad (5)$$

где  $Y_{\text{биол}}$  – величина потенциальной урожайности по сухому веществу, ц/га;  $Q_{\text{ФАР}}$  – приход ФАР за период вегетации культуры, ккал/га;  $K_{\text{ФАР}}$  – коэффициент использования (усвоения) ФАР посевом, %; удельная калорийность сухой биомассы, ккал/кг.

Таблица 3. Расчет прихода ФАР в зависимости от высоты растений, ккал/см<sup>2</sup>

Table 3. Calculation of the PAR arrival of depending on the height of plants, kcal / cm<sup>2</sup>

№ п/п	$K_R$	Высота растений, м / Height of the plant, m				
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Жамбылская область						
1	3,38	1,69	3,38	5,07	6,76	8,45
2	1,75	0,87	1,75	2,62	3,5	4,37
3	1,89	0,94	1,89	2,83	3,78	4,72
4	2,37	1,18	2,37	3,55	4,74	5,92
5	1,27	0,63	1,27	1,90	2,54	3,17
6	1,15	0,57	1,15	1,72	2,30	2,87
7	0,62	0,31	0,62	0,93	1,24	1,55
8	0,81	0,40	0,81	1,21	1,62	2,02
Среднее / Average						4,13

Таблица 4. Урожайность сухой и зеленой биомассы кукурузы на силос, ц/га, при  $h_p = 2,3$  м и  $Q_{\text{ФАР}} = 1,84$  кДж/см<sup>2</sup> (по М.К. Каюмову)

Table 4. Yield of dry and green corn biomass for silage, c/ha, at  $h_p = 2.3$  m and  $Q_{\text{PAR}} = 1.84$  kJ/cm<sup>2</sup> (according to M.K. Kayumov)

Административные области Administrative regions	Коэффициент использования ФАР / Coefficient of PAR usage				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Сухая масса / Dry mass					
Жамбылская	51,4	102,7	154,1	256,9	308,4
Зеленая масса / Green mass					
Жамбылская	257,0	513,5	770,5	1027,0	1284,5

Кроме того, из формулы М.К. Каюмова выражение ( $K_{\text{ФАР}}/100$  q), приравнивая к  $I_{\text{ФАР}}$  (индекс использования ФАР), можно записать как

$$Y_{\text{биол}} = Q_{\text{ФАР}} I_{\text{ФАР}} \quad (6)$$

Индекс использования ФАР – это доля поступающей солнечной радиации в области спектра ФАР, которая поглощается фотосинтетически активным организмом, обычно описывающая поглощение света интегрированным растительным пологом. Отсюда расчеты биомассы кукурузы на силос показывают идентичные данные с вычисленными по предложенной методике (табл. 5). При этом облегчается процесс вычисления, что дает возможность в производственных условиях

заблаговременно установить возможный урожай культуры.

Предлагаемая методика определения биомассы сельскохозяйственных культур позволяет без дополнительных затрат получить информацию по использованию солнечной энергии как основы фотосинтеза, транспирации, миграции трансформации элементов минерального питания и ассимилянтов.

Кроме того, установление прихода ФАР по высоте растений может оперативно выявить неблагоприятные тенденции основных фаз развития растений и позволяет принять соответствующие изменения и дополнения в агротехнику возделывания сельскохозяйственных культур.

Таблица 5. Урожайность сухой и зеленой биомассы кукурузы на силос (ц/га) при  $h_p = 2,3$  м, при  $Q_{\text{ФАР}} = 1,84$  кДж/см<sup>2\*</sup>

Table 5. Yield of dry and green corn biomass per silo, c/ha, at  $h_p = 2.3$  m, at  $Q_{\text{PAR}} = 1.84$  kJ/cm<sup>2\*</sup>

Административные области <i>Administrative regions</i>	Индекс использования ФАР / Index of PAR usage				
	30/0,5	50/1,0	84/1,5	110/2,0	140/2,5
Сухая масса / Dry mass					
Жамбылская	55,2	101,2	154,5	202,4	257,6
Зеленая масса / Green mass					
Жамбылская	276,0	506,0	772,5	1012,0	1208,0

\* В числителе – индекс использования ФАР, в знаменателе – показатели коэффициента использования ФАР по М.К. Каюмову.

\* Including – index of usage PAR, in denominator – indices of the usage of the PAR coefficient according to M.K. Kayumov.

### Выводы

Опытные данные расчета биомассы кукурузы при выращивании на силос свидетельствуют о том, что она колеблется в пределах 542-634 ц/га, что является близким к индексу использования ФАР – 55-84%. Для изучаемой зоны сухая биомасса может находиться в пределах

101,2-154,5 ц/га. В полевых экспериментах по установлению биомассы вручную были затрачены 3 рабочих дня двумя сотрудниками, что в переводе на энергозатраты составляет порядка 1247,4 МДж/чел. Отсюда следует, что предлагаемый метод определения биомассы позволяет снизить энергозатраты на 97,6%.

### Список использованной литературы

1. Безбородов Ю.Г. Энергетическая, экологическая и экономическая эффективность водосберегающей технологии орошения // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2005. № 6. С. 65-67.
2. Булаткин Г.А. Эколого-энергетические проблемы оптимизации продуктивности агроэкосистем: Препринт. Пушкино: ОНТИ НЦБИ, 1991. 41 с.
3. Кирейчева Л.В., Лентяева Е.А., Яшин В.М., Тимошкин А.Д. Методология точного регулирования параметров состояния агроэкосистемы с применением цифровых технологий, обеспечивающих повышение продуктивности и энергетического потенциала мелиорируемых земель // Каталог паспортов научно-технических достижений. Вып. 44. Коломна: ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», 2021. С. 17-18.
4. Тарасова Л.Л., Шульгин И.А. К вопросу об агроклиматической оценке урожайности зерновых культур в условиях изменения климата // Материалы

### References

1. Bezbordov Yu.G. Energy, environmental and economic efficiency of water-saving irrigation technology // Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2005. No. 6. pp. 65-67.
2. Bulatkin G.A. Ecological and energy problems of optimizing the productivity of agroecosystems: Preprint. Pushchino: ONTI NCBI, 1991. 41 p.
3. Kireicheva L.V., Lentyaeva E.A., Yashin V.M., Timoshkin A.D. Methodology of precise regulation of parameters of the state of the agroecosystem using digital technologies that increase productivity and energy potential of reclaimed lands // Catalog of passports of scientific and technical achievements. Issue 44. Kolomna: Research Institute of Irrigation systems and agricultural water supply "Rainbow", 2021. pp. 17-18.
4. Tarasova L.L., Shulgin I.A. On the issue of agro-climatic assessment of grain yield under climate change // Materials of the All-Russian Scientific Conference

Всероссийской научной конференции «Методы оценки сельскохозяйственных рисков и технологии смягчения последствий изменения климата в земледелии». СПб.: АФИ, 2011. С. 78-81.

5. **Безбородов Ю.Г., Хожанов Н.Н., Ауганбаева Ж.С.** Оценка продуктивности мелиоративных агроландшафтов Жамбылской области // Природообустройство. 2020. № 4. С. 22-27.

6. **Хожанов Н.Н.** Водопотребление сельскохозяйственных культур на основе энергетического баланса. Электронный учебник. Тараз: ЦНИТ, 2020.

7. **Авдеев С.М.** Коэффициенты увлажнения – важнейшие параметры для прогноза продуктивности многолетних агрофитоценозов // Растениеводство и луговое хозяйство: Сборник статей Всероссийской научной конференции с международным участием, Москва, 18-19 октября 2020 г. М.: ЭйПиСиПаблишинг, 2020. С. 424-426.

#### Критерии авторства

Безбородов Ю.Г., Хожанов Н.Н., Дудаков Н.К. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Безбородов Ю.Г., Хожанов Н.Н., Дудаков Н.К. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Статья поступила в редакцию 27.03.2023

Одобрена после рецензирования 03.06.2023

Принята к публикации 03.06.2023

“Methods for assessing agricultural risks and technologies for mitigating the effects of climate change in agriculture”. St. Petersburg: AFI, 2011. pp. 78-81.

5. **Bezborodov Yu.G., Khovanov N.N., Auganbaeva Zh.S.** Assessment of productivity of reclamation agricultural landscapes of Zhambyl region // Nature management. 2020. No. 4. pp. 22-27.

6. **Khozhanov N.N.** Water consumption of agricultural crops based on the energy balance. Electronic textbook. Tараz: TSNIT, 2020.

7. **Avdeev S.M.** Moisture coefficients – the most important parameters for predicting the productivity of long-term agrophyt // Crop and meadow growing: Collection of articles of the All-Russian Scientific Conference with International participation, Moscow, October 18-19, 2020, Moscow: EIPISIPUBLISHING, 2020. pp. 424-426.

#### Criteria of authorship

Bezborodov Yu.G., Kozhanov N.N., Dudakov N.K. performed theoretical studies, on the basis of which they carried out a generalization and wrote a manuscript. Bezborodov Yu.G., Kozhanov N.N., Dudakov N.K. have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

The article was received by the editorial office on 27.03.2023

Approved after review 03.06.2023

Accepted for publication 03.06.2023