

balancing mechanism. At the same time, as the authors point out, this condition can be considered necessary, but not sufficient. As a result, one more condition must be taken into account. The essence of the second condition is that the achieved difference should not only be minimal, but always positive, not allowing the copying skis to come off the edge of the ridge. Of course, if we strive to obtain a minimum difference in forces, then for a mechanism that guarantees optimal operating conditions, the dispersion of a given value should also be minimal in the process of oscillation of the working body relative to the frame of the machine. The study of mathematical models of the movement of the working body of an agricultural machine on modern personal computers makes it possible to identify the optimal parameters of the balancing mechanism that meet the requirements, and preliminary data on the quality of work, as well as significantly reduce the time spent on research.

Key words: working body, cabbage harvesting machine, copying, agricultural machine, differential equation, transfer function.

References

1. Belov, V. V. Parametry sistemy kopirovaniya rel'efa polya, povyshayushchie effektivnost' kapustoborochnoj mashiny: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / V. V. Belov. – Leningrad–Pushkin, 1989. – 16 с.
2. Belov, V. V. Teoreticheskie osnovy sinteza i konstruirovaniya pruzhinnyh mekhanizmov v mashinostroenii: monografiya / V. V. Belov. – CHEboksary: [b. i.], 2018. – 374 s.
3. Vysockij, A. A. Dinamometrirovaniye sel'skohozyajstvennyh mashin / A. A. Vysockij. – Moskva: Mashinostroenie, 1968. – 247 s.
4. Lur'e, A. B. Avtomatizaciya sel'skohozyajstvennyh agregatov / A. B. Lur'e. – Leningrad: Kolos, 1967. – 264 s.
5. Nekotorye aspekty ispol'zovaniya ozona i osobennosti primeneniya ozonatorov, povyshayushchie sohrannost' ubrannogo uroznya v ovoshchekhranilishchah. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya: monografiya / V. V. Belov [i dr.]. – Volgograd: Sfera, 2022. – 84 s.
6. Timoshenko, S. P. Kolebaniya v inzhernom dele / S. P. Timoshenko. – Moskva: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1959. – 439 s.
7. Halanskij, V. M. Sel'skohozyajstvennye mashiny / V. M. Halanskij, I. V. Gorbachev. – Moskva: Kolos, 2004. – 540 s.
8. Rossiya v cifrah. 2020. – Moskva: Rosstat, 2020. – 550 s.

Information about authors

1. **Larkin Sergey Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanization, Electrification and Automation of Agricultural Production, Chuvash State Agrarian University, 428003, Chuvash Republic, Cheboksary, st. K. Marx, 29; e-mail: sv_larkin@mail.ru;

2. **Belov Valery Vasilievich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanization, Electrification and Automation of Agricultural Production, Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, st. K. Marx, 29; e-mail: belovdtn@gmail.com;

3. **Belov Evgeniy Leonidovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanization, Electrification and Automation of Agricultural Production, Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, st. K. Marx, 29; e-mail: belovevg2008@yandex.ru.

УДК 51-7

DOI:

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА РОСТ РАСТЕНИЙ

И. В. Лукина, И. И. Максимов, Е. А. Деревянных, О. Г. Васильева

*Чувашский государственный аграрный университет
428003, Чебоксары, Российская Федерация*

Аннотация. Развитие и расширение сельскохозяйственного производства, повышение урожайности сельскохозяйственных культур невозможно без учета климатических ресурсов, прежде всего, солнечного тепла. Особые требования предъявляются к преобразованию солнечной радиации в атмосфере и на земной поверхности. Солнечная радиация является важнейшим условием жизни растений. Это энергия, которую растения используют в процессе фотосинтеза для роста и развития. Изучение и практическое использование математических моделей солнечной радиации позволяют оценить ее с точки зрения условий окружающей среды, а это, в свою очередь, при грамотном управлении и использовании полученных данных может оказать непосредственное влияние на повышение урожайности. В данной статье анализируется коэффициент светообеспеченности, определяющий надежность функционирования системы растение-почва-воздух. Данная величина определяется для различных экспозиций склона. В статье также анализируются особенности

радиационного режима наклонных поверхностей. С помощью математических моделей были описаны прямая солнечная радиация; поток радиации на вертикальную поверхность любой ориентации; поток рассеянной радиации на наклонную поверхность в случае изотропной рассеянной радиации; величина потока отраженной радиации, получаемой склоном; суммарная радиация на различно ориентированные наклонные поверхности; эффективное излучение наклонной поверхности, радиационный баланс произвольно ориентированной наклонной поверхности. Были исследованы основные параметры энергетической освещенности солнечной радиацией поверхностей с учетом различных условий, а именно: радиационный баланс деятельной поверхности при средних условиях облачности в течение года, средние суммы солнечной радиации за сутки в течение года и радиационный баланс деятельной поверхности при среднем небе в течение суток за год.

Ключевые слова: математические модели, солнечная радиация, система растение-почва-воздух, светообеспеченность, радиационный режим, экспозиции склонов, радиационный баланс.

Введение. Как известно, урожайность зерновых культур зависит от многих параметров. К ним относят свойства сортов данной культуры, агротехнические мероприятия, проводимые в процессе формирования посевов, и параметры окружающей среды в период роста и развития растений. Из них первые два компонента можно регулировать и оптимизировать, третий – неуправляем. Именно этот компонент является значимым для растений, и его необходимо всегда учитывать. Один из метеоклиматических параметров – солнечная радиация, которая, являясь источником питания организмов, незаменима и не поддается управлению.

Различают три разновидности солнечной радиации: прямая, рассеянная и противоизлучение атмосферы. Под потоком солнечной радиации S принято понимать величину, равную количеству лучистой энергии, получаемой в единицу времени единицей площади, расположенной в направлении, перпендикулярном солнечным лучам.

Повышенная интенсивность прямой солнечной радиации, большая продолжительность солнечного сияния и высокая температура окружающей среды являются благоприятными условиями для практического использования солнечной энергии.

Цель настоящей работы – анализ математических моделей солнечной радиации, функционирующей в системе растение-почва-воздух (Р-П-В), и исследование основных параметров энергетической освещенности поверхностей солнечной радиацией с учетом различных условий.

Материалы и методы исследований. Одним из показателей, обеспечивающих надежность функционирования системы растение-почва-воздух, является коэффициент светообеспеченности (m_s).

Коэффициент светообеспеченности m_s в системе Р-П-В на склонах был исследован И. И. Максимовым [5], [6], [7], [20] и другими учеными [1], [2], [3], [4], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19]. Радиационный баланс R , формирующийся на подстилающей поверхности, состоит из части $R^{(n)}$, достигающей поверхности почвы, и остатка $R^{(H)}$, формирующегося на верхней границе H растений.

Поскольку склоны располагаются в различных экспозициях, то есть направлениях, то величина m_s для различных экспозиций склона будет равна:

$$m_s = \frac{R^{(H_s)}}{R^{(H_s)} + R^{(n_s)}} \quad (1)$$

Для горизонтально расположенных сельскохозяйственных полей каждый элемент $R^{(n)}$ и $R^{(H)}$ может быть записан в развернутом виде:

уравнение теплового баланса на уровне поверхности почвы $X=0$

$$R^{(n)} = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} + C_p \rho k(x) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} + L \rho k(x) \left. \frac{\partial q}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (2)$$

уравнение теплового баланса на высоте крон растений $X=H$

$$R = R^{(H)} + R^{(n)} = -C_p \rho k(x) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=H-0} + C_p \rho k(x) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=H+0} - L \rho k(x) \left. \frac{\partial q}{\partial x} \right|_{x=H-0} - L \rho k(x) \left. \frac{\partial q}{\partial x} \right|_{x=H+0} + R^{(n)} \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности почвы, Вт/(м·К); $k(x)$ – коэффициент турбулентности, м²/с; C_p – теплопроводность воздуха, Дж/(кг·К); ρ – плотность воздуха, кг/м³; L – скрытая теплота парообразования воды, Дж/кг; q – удельная влажность воздуха; $\partial T/\partial x$ – вертикальный градиент температуры воздуха; $\partial q/\partial x$ – вертикальный градиент влажности воздуха; H – высота растений, м; X – единое обозначение для температуры системы почва – воздух T вдоль координаты x , положительное значение которой отсчитывается в сторону воздуха $x>0$, а отрицательное – в сторону почвы.

Поскольку входящие в уравнение (2) и (3) коэффициенты и величины для склонов различной крутизны и экспозиции разные, то при определении их влияния на коэффициент светообеспеченности m_s представляется целесообразным учесть обобщенный коэффициент крутизны и экспозиции склонов $k_{кс}$:

где $I'(h, \psi)$ – интенсивность отраженной радиации.

$$h(\psi) = ar \cos \frac{\cos \delta}{\sqrt{1 - \sin^2 \delta \cos^2 \psi}} \quad (12)$$

при $0 \leq \psi \leq \pi$.

Предполагая, что радиация, отраженная горизонтальной поверхностью, изотропна ($I'(h, \psi) = I' = const$), получим вместо (11) более простое выражение:

$$R_s = 2I' \int_0^{p/2} d\psi \int_0^{h(\psi)} \sin h \cos h dh = pI' \sin^2 \delta / 2. \quad (13)$$

Наибольший практический интерес представляет определение направления потоков и сумм суммарной радиации на различно ориентированных наклонных поверхностях:

$$\Sigma Q_s = \Sigma Q_H \frac{\Sigma S_s}{\Sigma S_H}, \quad (14)$$

где $Q_s = S_s + D_s + R_s$, ΣQ_H – суммарная радиация для горизонтальной поверхности, ΣS_s – суточная сумма прямой солнечной радиации на склон, ΣS_H – суточная сумма прямой радиации на горизонтальную поверхность, S_s – прямая радиация, направленная на склон, D_s – рассеянная радиация, направленная на склон, R_s – отраженная радиация, направленная на склон.

Расходной частью радиационного баланса подстилающей поверхности или любой другой поверхности произвольной ориентации является эффективное излучение (разность восходящего и нисходящего потоков длинноволновой радиации). Общее соотношение, связывающее поток эффективного излучения с его интенсивностью, имеет вид:

$$F_s = \int_0^{2p} d\psi \int_{h(\psi)}^{p/2} f(h, \psi) \cos i \cos h dh. \quad (15)$$

где $f(h, \psi)$ – интенсивность эффективного излучения в направлении, которое определяется сферическими координатами h (угловая высота по отношению к плоскости горизонта) и ψ (азимут); i – угол между нормалью к поверхности склона и направлением визирования I (рис.1), то есть угол падения луча на поверхность склона.

Для склонов малой крутизны:

$$F_s = F_H \cos \delta. \quad (16)$$

Общая формула для эффективного излучения наклонной поверхности имеет вид:

$$F_s = 2 \int_0^p d\psi \int_{h(\psi)}^{p/2} f(h, \psi) (\sin \delta \cos h \cos \psi + \cos \delta \sin h) \cos h dh + \frac{du(T_s^4 - T_H^4) \sin^2 \delta}{2}, \quad (17)$$

а в случае склонов малой крутизны

$$F_s = F_H \cos \delta + \frac{du(T_s^4 - T_H^4) \sin^2 \delta}{2}, \quad (18)$$

где u – постоянная Стефана-Больцмана.

Формулу радиационного баланса для различных экспозиций можно выразить следующим образом:

$$B_s = S_s + D_s + R_s - R_s' + \delta G_s + \delta G_s' + \delta U_{H,s} - U_s, \quad (19)$$

где S_s, D_s – прямая и рассеянная радиации, направленные на поверхность склона; R_s – коротковолновая радиация, отраженная на склон от горизонтальной поверхности перед склоном; R_s' – коротковолновая радиация, отраженная от поверхности склона; G_s – противозлучение атмосферы, направленное на склон; G_s' – противозлучение атмосферы, отраженное горизонтальной поверхностью к склону; $U_{H,s}$ – тепловое излучение горизонтальной поверхности перед склоном, направленное на поверхность склона; U_s – тепловое излучение склона.

Результаты исследований и их обсуждение. На основании вышеописанных математических моделей энергетической освещенности солнечной радиацией были исследованы и представлены в графическом виде динамические изменения некоторых показателей солнечной радиации.

В таблице 1 представлены станции и их географическое расположение, относительно которых рассматривались изменения солнечной радиации.

Таблица 1 – Географическое расположение станций

Станции	Вязовые (Республика Татарстан)	Самара, (Самарская область)	Чебеньки (Оренбургская область)	Росташи (Саратовская область)	Ершов (Саратовская область)
широта	54°54'18"	53°13'19"	51°55'57"	51°51'00"	51°21'04"
долгота	58°21'21"	50°11'36"	55°42'18"	43°36'00"	48°16'35"

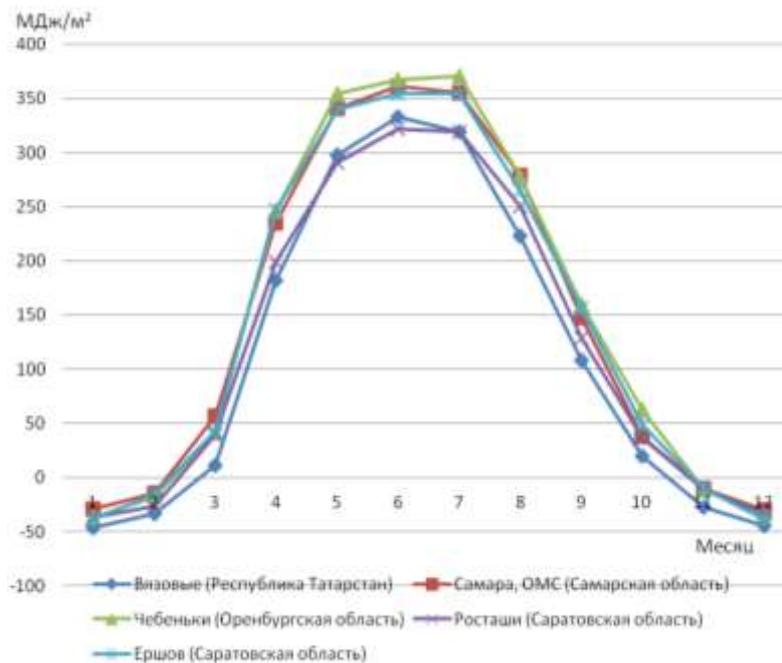


Рис.2. Радиационный баланс деятельной поверхности при средних условиях облачности в течение года

На рисунке 2 представлены средние суммы радиационного баланса за год для различных исследуемых станций.

В течение вегетационного периода более высокие радиационные балансы наблюдаются в Оренбургской области, Самарской области и в Саратовской области (Ершов). Указанные области имеют небольшие расхождения по широте. Поэтому в этих областях из-за малоснежья выращивается преимущественно яровая пшеница. Более низкий суммарный радиационный баланс в Республике Татарстан и в Саратовской области (Росташи).

Далее рассмотрим динамику средних сумм солнечной радиации за сутки в течение года для станции Вязовые (рис.3).

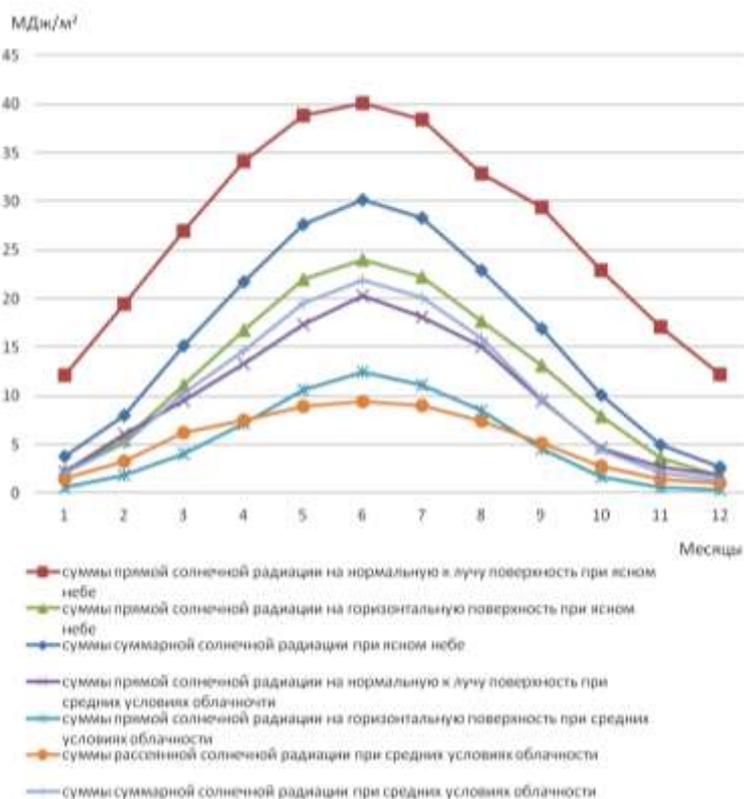


Рис.3. Средние суммы солнечной радиации за сутки в течение года

В период вегетации показатели солнечной радиации в условиях ясного неба значительно превосходят показатели солнечной радиации в условиях средней облачности. Эти суммы солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность выше, чем на горизонтальную. Наименьшие значения имеет рассеянная солнечная радиация. Однако при средних условиях облачности рассеянная радиация в период вегетации ниже прямой солнечной радиации, а в другие периоды – выше.

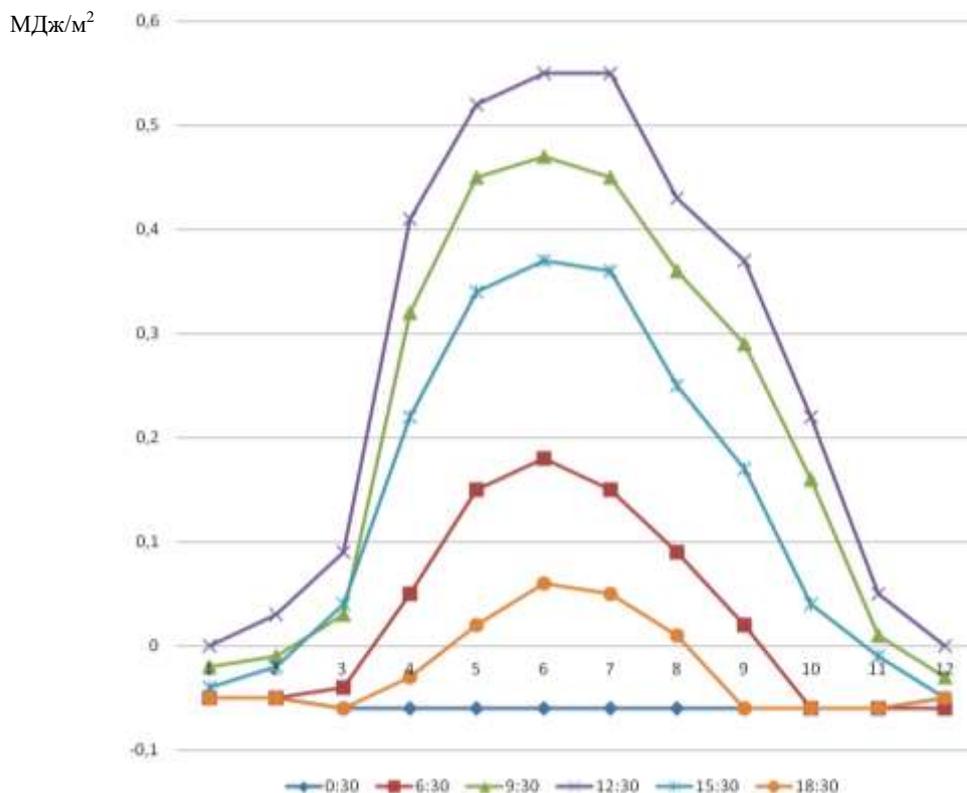


Рис.4. Данные радиационного баланса деятельной поверхности при ясном небе в течение суток за год

Рассмотрим динамику радиационного баланса за сутки в период вегетации (рис. 4). Наблюдения показывают, что в интервале от 0 ч. 30 мин. до 12 ч. 30 мин. радиационный баланс плавно повышается, а затем к 18 ч. 30 мин. также плавно уменьшается.

Выводы. На сегодняшний день влияние солнечной радиации на рост сельскохозяйственных культур изучен недостаточно. Проведенный анализ математических моделей солнечной радиации позволил охарактеризовать основные виды солнечной радиации в динамике.

В работе были исследованы основные параметры энергетической освещенности солнечной радиацией поверхностей с учетом различных условий. Учет радиационных условий в период вегетации будет полезен при оценке урожайности посевов, а также при прогнозировании состояния посевов сельскохозяйственных культур.

Литература

1. Журавлева, В. В. Математические модели процессов регуляции в физиологии растений / В. В. Журавлева // Известия Алтайского государственного университета. – 2008. – № 1 (57). – С. 43-57.
2. Жученко, А. А. Адаптивный потенциал культурных растений (эколого-генетические основы) / А. А. Жученко. – Кишинев: Штиинца, 1988. – 767 с.
3. Зотин, А. И. Направление, скорость и механизмы прогрессивной эволюции (термодинамические подходы биологической эволюции) / А. И. Зотин, А. А. Зотин. – Москва: Наука, 1999. – 533 с.
4. Кондратьев, К. Я. Радиационный режим наклонных поверхностей / К. Я. Кондратьев, З. И. Пивоварова, М. Ф. Федорова. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1978. – 170 с.
5. Максимов, И. И. Исследование светообеспеченности в системе растение-почва-воздух на склонах разной крутизны и экспозиции / И. И. Максимов, О. Н. Цыганова // Молодежь и инновации: материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Чебоксары: ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА, 2020. – С. 249-256.
6. Максимов, И. И. Функционирование системы «растение – почва – воздух» / И. И. Максимов, Е. А. Максимов // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 2 (2). – С. 29-33.

7. Максимов, И. И. Функционирование системы «растение – почва – воздух» / И. И. Максимов, В. И. Максимов, С. А. Васильев // Энергосберегающие агротехнологии и техника для северного земледелия и животноводства: материалы Международной научной конференции. – Киров: ООО «Кировская областная типография», 2018. – С.54-63.
8. Нерпин, С. В. Энерго- и массообмен в системе растение-почва-воздух / С. В. Нерпин, А. Ф. Чудновский. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. – 358 с.
9. Полуэтков, Р. А. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р. А. Полуэтков, Э. И. Смоляр, В. В. Терлеев. – Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2006. – 396 с.
10. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – Москва: Мир, 2002. – 461 с.
11. Раунер, Ю. Л. Климат и урожайность зерновых культур / Ю. Л. Раунер. – Москва: Наука, 1981. – 163 с.
12. Росс, Ю. К. К математическому описанию роста растений / Ю.К. Росс // Доклады Академии наук СССР. – 1966. – Том 171, № 2. – С.481-483.
13. Торнли, Дж. Г.М. Математические модели в физиологии растений / Дж. Г.М. Торнли. – Киев: Наук. Думка, 1982. – 310 с.
14. Bessonov, N. Dynamical Models of Plant Growth / N. Bessonov, V. Volpert // Mathematics and Mathematical modeling 2000. Mathematics Subject Classification, Environmental Science, 2006. – Текст: электронный // URL: plant.pdf (univ-lyon1.fr).
15. Christopher, B. S. Teh. Introduction to Mathematical Modeling of Crop Growth: How the Equations are Derived and Assembled into a Computer Program / B. S. Christopher // Brown Walker Press. – April – 2006.
16. Davidson, J. I. Light and pasture growth / J. I. Davidson, J. R. Philli // Climatology and Microclimatology, UNESCO, 1958. – P. 181-187.
17. Euan, T Smithers Mathematical principles and models of plant growth mechanics: from cell wall dynamics to tissue morphogenesis / Euan T. Smithers, Jingxi Luo, Rosemary J. Dyson // Journal of Experimental Botany. – Volume 70. – Issue 14, 1 July. – 2019. – P. 3587 – 3600.
18. Mathematical Modeling of the Dynamics of Shool-Root Interactions and Resource Partitioning in Plant / Feller Chrystel [et al.]. – 2015. – Growth July 8.
19. Poluektov, R.A. Agrotool – a system for crop simulation / R.A. Poluektov [et. al.] // Archives of Agronomy and Soil Science. – Received 10, Sep 2002. – Published online: 28 Jul 2006. – P. 1476-3567. 48(6):609-635.
20. Towards a mathematical model of plant growth / I. Maksimov [et al.] // International AgroScience Conference (AgroScience-2021). Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 935. 16 April. – Cheboksary, 2021.– P. 012031.

Сведения об авторах

1. **Лукина Ирина Васильевна**, старший преподаватель кафедры математики, физики и информационных технологий, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, г. Чебоксары, ул. Карла Маркса, 29, e-mail: iv_rabota@inbox.ru, тел. 89278478408;
2. **Максимов Иван Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин и комплексов, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, г. Чебоксары, ул. Карла Маркса, 29, e-mail: maksimov48@inbox.ru, тел. 89373834088;
3. **Деревянных Евгения Анатольевна**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, физики и информационных технологий, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, г. Чебоксары, ул. Карла Маркса, 29, e-mail: jane-evgeniya@yandex.ru, тел. 89053450435;
4. **Васильева Ольга Геннадьевна**, кандидат экономических наук, доцент кафедры математики, физики и информационных технологий, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, г. Чебоксары, ул. Карла Маркса, 29, e-mail: olech.vasiljeva@yandex.ru, тел. 89196704397.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SOLAR RADIATION ON PLANT GROWTH

I. V. Lukina, I. I. Maksimov, E. A. Derevyanykh, O. G. Vasilyeva

*Chuvash State Agrarian University
428003, Cheboksary, Russian Federation*

Brief abstract. *The development and expansion of agricultural production, increasing the productivity of agricultural crops is impossible without taking into account climatic resources, primarily solar heat. Special requirements are imposed on the transformation of solar radiation in the atmosphere and on the earth's surface. Solar radiation is the most important condition for plant life. This is the energy that plants use during photosynthesis to grow and develop. The study and practical use of mathematical models of solar radiation make it possible to assess it from the point of view of environmental conditions, and this, in turn, with proper management and use of the data obtained,*

can have a direct impact on increasing productivity. This article analyzes the coefficient of light supply, which determines the reliability of the functioning of the plant-soil-air system. This value is determined for different slope exposures. The article also analyzes the features of the radiation regime of inclined surfaces. With the help of mathematical models, direct solar radiation was described; radiation flux onto a vertical surface of any orientation; scattered radiation flux onto an inclined surface in the case of isotropic scattered radiation; the magnitude of the flux of reflected radiation received by the slope; total radiation to differently oriented inclined surfaces; effective radiation of an inclined surface, radiation balance of an arbitrarily oriented inclined surface. The main parameters of the energy illumination of surfaces by solar radiation were studied, taking into account various conditions, namely: the radiation balance of the active surface under average cloudy conditions during the year, the average amount of solar radiation per day during the year, and the radiation balance of the active surface under clear sky during the day year.

Key words: mathematical models, solar radiation, plant-soil-air system, light supply, radiation regime, slope exposures, radiation balance.

References

1. ZHuravleva, V. V. Matematicheskie modeli processov regulyatsii v fiziologii rastenij / V. V. ZHuravleva // Izvestiya Altajskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2008. – № 1 (57). – S. 43-57.
2. ZHuchenko, A. A. Adaptivnyj potencial kul'turnyh rastenij (ekologo-geneticheskie osnovy) / A. A. ZHuchenko. – Kishinev: SHTiunca, 1988. – 767 s.
3. Zotin, A. I. Napravlenie, skorost' i mekhanizmy progressivnoj evolyucii (termodinamicheskie podhody biologicheskoy evolyucii) / A. I. Zotin, A. A. Zotin. – Moskva: Nauka, 1999. – 533 s.
4. Kondrat'ev, K. YA. Radiacionnyj rezhim naklonnyh poverhnostej / K. YA. Kondrat'ev, Z. I. Pivovarova, M. F. Fedorova. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. – 170 s.
5. Maksimov, I. I. Issledovanie svetoobespechennosti v sisteme rastenie-pochva-vozduh na sklonah raznoj krutizny i ekpozicii / I. I. Maksimov, O. N. Cyganova // Molodezh' i innovacii: materialy XVI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov. – CHEboksary: FGBOU VO CHuvashskaya GSKHA, 2020. – S. 249-256.
6. Maksimov, I. I. Funkcionirovanie sistemy «rastenie – pochva – vozduh» / I. I. Maksimov, E. A. Maksimov // Vestnik CHuvashskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii. – 2017. – № 2 (2). – S. 29-33.
7. Maksimov, I. I. Funkcionirovanie sistemy «rastenie – pochva – vozduh» / I. I. Maksimov, V. I. Maksimov, S. A. Vasil'ev // Energoberegayushchie agrotekhnologii i tekhnika dlya severnogo zemledeliya i zhivotnovodstva: materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. – Kirov: OOO «Kirovskaya oblastnaya tipografiya», 2018. – S.54-63.
8. Nerpin, S. V. Ergo- i massobmen v sisteme rastenie-pochva-vozduh / S. V. Nerpin, A. F. CHudnovskij. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975. – 358 s.
9. Poluetkov, R. A. Modeli produkcionnogo processa sel'skohozyajstvennyh kul'tur / R. A. Poluetkov, E. I. Smolyar, V. V. Terleev. – Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universitet, 2006. – 396 s.
10. Prigozhin, I. Sovremennaya termodinamika. Ot teplykh dvigatelej do dissipativnyh struktur / I. Prigozhin, D. Kondepudi. – Moskva: Mir, 2002. – 461 s.
11. Rauner, YU. L. Klimat i urozhajnost' zernovyh kul'tur / YU. L. Rauner. – Moskva: Nauka, 1981. – 163 s.
12. Ross, YU. K. K matematicheskomu opisaniju rosta rastenij / YU.K. Ross // Doklady Akademii nauk SSSR. – 1966. – Tom 171, № 2. – S.481-483.
13. Tornli, Dzh. G.M. Matematicheskie modeli v fiziologii rastenij / Dzh. G.M. Tornli. – Kiev: Nauk. Dumka, 1982. – 310 s.
14. Bessonov, N. Dynamical Models of Plant Growth / N. Bessonov, V. Volpert // Mathematics and Mathematical modeling 2000. Mathematics Subject Classification, Environmental Science, 2006. – Tekst: elektronnyj // URL: plant.pdf (univ-lyon1.fr).
15. Christopher, B. S. Teh. Introduction to Mathematical Modeling of Crop Growth: How the Equations are Derived and Assembled into a Computer Program / B. S. Christopher // Brown Walker Press. – April – 2006.
16. Davidson, J. I. Light and pasture growth / J. I. Davidson, J. R. Philli // Climatology and Microclimatology, UNESCO, 1958. – P. 181-187.
17. Euan, T Smithers Mathematical principles and models of plant growth mechanics: from cell wall dynamics to tissue morphogenesis / Euan T. Smithers, Jingxi Luo, Rosemary J. Dyson // Journal of Experimental Botany. – Volume 70. – Issue 14, 1 July. – 2019. – P. 3587 – 3600.
18. Mathematical Modeling of the Dynamics of Shool-Root Interactions and Resource Partitioning in Plant / Feller Chrystel [et al.]. – 2015. – Growth July 8.
19. Poluetkov, R.A. Agrotool – a system for crop simulation / R.A. Poluetkov [et. al.] // Archives of Agronomy and Soil Science. – Received 10, Sep 2002. – Published online: 28 Jul 2006. – P. 1476-3567. 48(6):609-635.
20. Towards a mathematical model of plant growth / I. Maksimov [et al.] // International AgroScience Conference (AgroScience-2021). Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 935. 16 April. – Cheboksary, 2021.– P. 012031.

Information about authors

1. **Lukina Irina Vasilievna**, Senior Lecturer of the Department of Mathematics, Physics and Information Technology, Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, st. Karl Marx, 29, e-mail: iv_rabota@inbox.ru, tel. 89278478408;

2. **Maksimov Ivan Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Complexes, Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, st. Karl Marx, 29, e-mail: maksimov48@inbox.ru, tel. 89373834088;

3. **Derevyannykh Evgenia Anatolyevna**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, Physics and Information Technologies, Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, st. Karl Marx, 29, e-mail: jane-evgeniya@yandex.ru, tel. 89053450435;

4. **Vasilyeva Olga Gennadievna**, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, Physics and Information Technologies, Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, st. Karl Marx, 29, e-mail: olech.vasiljeva@yandex.ru, tel. 89196704397.

УДК 629.113:629.332

DOI:

**О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ
УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНОГО ПОЕЗДА**

О. Г. Огнев¹, Ю. Н. Строганов², А. Н. Максимов³, Н. Н. Белова³

¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Уральский федеральный университет
620002, Екатеринбург, Российская Федерация

³Чувашский государственный аграрный университет
428003, Чебоксары, Российская Федерация

Аннотация. Сельское хозяйство сегодня является одной из наиболее транспортеемких отраслей народного хозяйства. Благодаря интенсивному развитию сельского хозяйства, перевозка товаров сельскохозяйственного производства растет из года в год. Для осуществления растущего объема перевозок товаров широко используются автотранспортные поезда (АТП), которые являются на сегодняшний день наиболее популярным транспортным средством не только в нашей стране, но и за рубежом. При этом к АТП предъявляются новые требования: необходимость повышения скорости и увеличения тоннажа доставляемых грузов. Поэтому улучшение эксплуатационных характеристик АТП, позволяющее снизить аварийность на трассах, по-прежнему является актуальной проблемой, которая имеет также важное практическое значение. Безопасность движения автотранспортных поездов на дорогах во многом зависит от устойчивости их перемещения по оптимальной траектории. В представленной работе предлагается использовать математическую модель, которая позволит произвести оценку устойчивости движения автотранспортных поездов на дорогах, а также определить направление повышения безопасности их движения. Сущность модели заключалась в том, что процесс колебания АТП и его элементов вследствие внешнего возмущающего воздействия на трассе разбивается на несколько характерных этапов, основные параметры которых (амплитуда смещения и угол поворота элементов АТП относительно направления движения) определялись исходя из первоначальных условий движения АТП, силы и продолжительности внешнего воздействия. Предполагается, что повысить безаварийность движения автотранспортных поездов можно с помощью изменения конструктивных характеристик прицепных устройств. Научная новизна и практическая значимость работы подтверждается полученными патентами на разработанные технические устройства и результатами лабораторных испытаний.

Ключевые слова: автотранспортный поезд, математическая модель, анализ механизма, устойчивость движения, закон сохранения импульса.

Введение. Каждое десятое ДТП (дорожно-транспортное происшествие) в РФ происходит с участием грузовых автомобилей и автотранспортных поездов (АТП) [7]. С учетом того, что только за 2019 г. число ДТП в России составило 147 738 случаев, а число пострадавших – 189 671 человек, в том числе 15 158 человек погибших [6], исследование проблемы обеспечения устойчивости движения АТП является достаточно актуальным.

Целью исследований являлось формирование математической модели движения АТП в условиях посторонних воздействий, например, боковых сил и прочее.