



ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2026.3.1>

UDC 628.95

LBC 26.233



RESEARCH OF THE CONDITIONS TO REACH BY THE PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE COMPONENT OF OPTICAL RADIATION OF THE SUN AT THE EARTH'S SURFACE

Hikmat H. oglu Asadov

National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

Khumar S. kyzy Aliyeva

National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

Ulker F. kyzy Mammadova

Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan Republic

Abstract. The aim of the research is to determine conditions to achieve the maximum amount of photosynthetically active components of solar optical radiation necessary for the normal development of vegetation on the Earth's surface. The article analyzes the conditions for achieving the maximum amount of photosynthetically active solar optical radiation (PAR components) on the vegetation, taking into account absorption by atmospheric components. The problem of determining the conditions contributing to the appearance of extreme values of the photosynthetically active part of the solar optical radiation reaching the Earth's surface has been formed and solved. It has been established that the minimum photosynthetically active optical radiation component of solar radiation on the Earth's surface appears in the first months of the year (i.e., in winter), which shows a good consistency of such natural processes as the attenuation of the PAR component of solar radiation and the phenology of vegetation development.

Key words: photosynthetically active radiation, Earth's vegetation surface, phenological development cycle, optimization, optical radiation absorption, atmospheric components.

Citation. Asadov H.H. oglu, Aliyeva Kh.S. kyzy, Mammadova U.F. kyzy. Research of the Conditions to Reach by the Photosynthetically Active Component of Optical Radiation of the Sun at the Earth's Surface. *Prirodnye sistemy i resursy* [Natural Systems and Resources], 2026, vol. 16, no. 3, pp. 5-11. DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2026.3.1>

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ДОСТИЖЕНИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Хикмет Гамид оглы Асадов

Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

Хумар Сабир гызы Алиева

Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

Улькер Физули гызы Маммадова

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и промышленности,
г. Баку, Азербайджанская Республика

Аннотация. Целью исследования является определение условий достижения земной поверхности максимального количества фотосинтетически активной компоненты солнечного оптического излучения, необходимой для нормального развития растительности. В статье проанализированы условия достижения максимального количества фотосинтетически активной частью солнечного оптического излучения (PAR-компоненты) дошедшей растительной поверхности Земли с учетом поглощения атмосферными компонентами. Сформирована и решена задача выяснения условий, содействующих появлению экстремальных величин фотосинтетически активной части Солнечной оптической радиации достигающей Земной поверхности. Установлено, что минимум фотосинтетически активной оптической радиационной компоненты Солнечного излучения на земной поверхности появляется в первые месяцы (то есть зимой) года, что показывает хорошую согласованность таких природных процессов, как ослабление PAR-компоненты Солнечной радиации и фенология развития растительности.

Ключевые слова: фотосинтетически активная радиация, фенологический цикл развития, оптимизация, поглощение оптического излучения, атмосферные компоненты.

Цитирование. Асадов Х. Г. оглы, Алиева Х. С. гызы, Маммадова У. Ф. гызы. Исследование условий достижения фотосинтетически активной составляющей оптического излучения Солнца земной поверхности // Природные системы и ресурсы. – 2026. – Т. 16, № 3. – С. 5–11. – DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2026.3.1>

Введение. Хорошо известно, что активное функционирование растительности и степень ее полезности для поддержания жизни на планете во многом обусловлена фотосинтетически активной частью оптического излучения Солнца (PAR). Эта составляющая Солнечной оптической радиации обеспечивает вес процесс синтеза, а следовательно, и развития растительности, то есть цикличес-

кий повтор всех фенологических фаз живого растительного покрова Земли.

Как отмечается в работе [2] основными составляющими оптической радиации Солнца являются ультрафиолетовая (UV) радиация, PAR-составляющая и близкая инфракрасная составляющая. Область длин волн указанных составляющих приведена в таблице [2].

Граничные длины волн основных областей оптической радиации Солнца

Области оптического излучения	λ_{min} (нм)	λ_{max} (нм)
UV	289,71	400
PAR	400	700
NIR	700	995,26

Вышеуказанные области оптического солнечного излучения характеризуются некоторыми численными показателями. Например, фракционная количественная оценка каждой из вышеуказанных областей может быть дана в виде следующего отношения:

$$F_i = \frac{\int_{\lambda_{imin}}^{\lambda_{imax}} I_i(\lambda) d\lambda}{\sum_{i=1}^3 \int_{\lambda_{imin}}^{\lambda_{imax}} I_i(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3$; $I_i(\lambda)$ – интенсивность Солнечного излучения в i -й области.

Отметим, что в работе [2] также предлагается следующая количественная характеристика η соответствующей фракции Солнечного оптического излучения:

$$\eta = \int_{\lambda_{imin}}^{\lambda_{imax}} I_i(\lambda) d\lambda = \frac{1}{2} [I_i(\lambda_{imax}) + I_i(\lambda_{imin})](\lambda_{imax} - \lambda_{imin}). \quad (2)$$

Вместе с тем следует отметить, что фракция PAR-оптической радиации Солнца, определяемая в области длин волн $400 \div 700$ нм подвержена значительному атмосферному воздействию, приводящему значительному ослаблению указанной фракции. Ослабление PAR-фракции обусловлено в основном наличием таких факторов, как рэлеевское ослабление, аэрозоль и озон.

Далее в настоящей статье рассматривается вопрос об оптимальном соотношении ука-

занных факторов, при котором PAR-составляющая оптической радиации Солнца, доходящая до поверхности достигает экстремальных величин.

Материалы и методы

Рассмотрим модельный случай, когда показатель z остается постоянной величиной.

Как отмечается в работе [6] прямая спектральная освещенность на некоторой части земной поверхности, нормальной к прямому Солнечному излучению определяется по формуле:

$$E = E_0 \cdot \tau_r \cdot \tau_{or} \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_a, \quad (3)$$

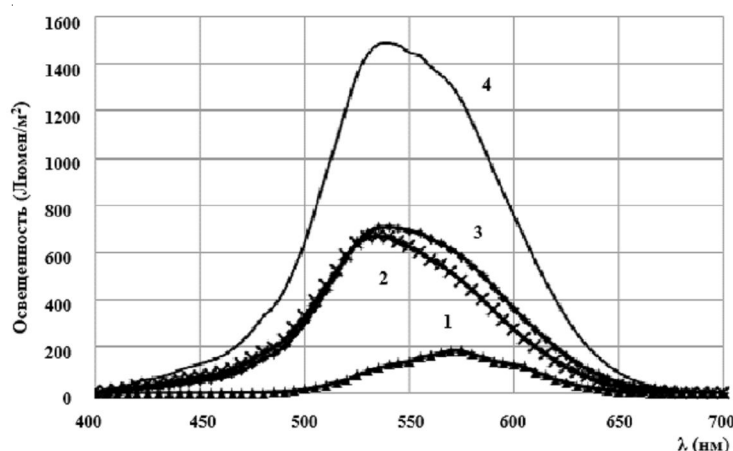
где E_0 – внеатмосферное спектральное излучение; τ_r – коэффициент ослабления из-за Рэлеевского рассеяния; τ_{or} – коэффициент ослабления из-за атмосферного озона; τ_g – коэффициент ослабления из-за атмосферных газов; τ_w – коэффициент ослабления из-за водяных паров; τ_a – коэффициент ослабления из-за воздействия атмосферного аэрозоля.

При этом освещенность на поверхности Земли определяется как:

$$I = F \cdot E, \quad (4)$$

где F – фотооптическая функция, зависящая от длины волны [6].

Так как далее анализируется визуальная фракция солнечного излучения следует учесть, что основными ослабляющими солнечное излучение факторами являются рэле-



Влияние трех факторов на ослабление Солнечного излучения на Земной поверхности

1 – ослабление из-за озона; 2 – ослабление из-за рэлеевского рассеяния;
3 – ослабление из-за аэрозоля; 4 – суммарное ослабление

евское рассеяние, озон и аэрозоль [3–5]. Этот факт хорошо иллюстрируется графиками, показанными на рисунке [6].

С учетом вышеуказанного освещенность Земной поверхности Солнечным излучением может быть оценена известной формулой Лекнера [7]:

$$E_{\lambda} = E_{0\lambda} \exp[-\alpha_1 \lambda_1^{b_1 m}] \cdot \exp[-K \times I \cdot m] \cdot \exp[-\beta \lambda^{-\gamma} \cdot m], \quad (5)$$

где $E_{0\lambda}$ – внеатмосферное излучение на длине волны λ ; $\alpha_1 = 0,008735$; $b_1 = 4,0$; K – спектральный коэффициент поглощения озона; I – общее количество озона; m – оптическая масса воздуха; β – коэффициент аэрозольной мутности; γ – показатель аэрозольного ослабления.

Рассматривая далее модельный случай постоянства воздействия Рэлеевского рассеяния на интервале $\lambda_{min} \div \lambda_{max}$ формулу (5), запишем в виде:

$$E_{\lambda} = E_{0\lambda} \cdot C_{\lambda} \exp[-m(x_1 \alpha_1 + x_2 \alpha_2)], \quad (6)$$

где $C_{\lambda} = [-\alpha_1 \lambda_1^{b_1 m}]$, $x_1 = I$, $\alpha_1 = k_{\lambda}$, $\alpha_2 = \lambda^{-\gamma}$, $x_2 = \beta$.

Проинтегрируем выражение и в интервале $\lambda_{min} \div \lambda_{max}$:

$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} E_{\lambda} d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} E_{0\lambda} C_{\lambda} \exp[-m(x_1 \alpha_1 + x_2 \alpha_2)] d\lambda. \quad (7)$$

Введем на рассмотрение модельную функцию взаимосвязи x_1 и x_2 в виде:

$$x_1 = f(x_2). \quad (8)$$

В предположении постоянства η наложив на функцию (8) следующего ограничительно-го условия:

$$\int_{x_{2min}}^{x_{2max}} f(x_2) dx_2 = C_1, \quad (9)$$

где $C_1 = const$.

Будем искать оптимальный вид функции $f(x_2)$ при которой оценка (7) мог бы достичь

экстремума, где x_{2min} ; x_{2max} – предельные возможные значения фактора x_2 .

Следует отметить, что условие (9) возможно вследствие того, что между x_1 и x_2 возможна как положительная, так и отрицательная корреляция, что подтверждается результатами измерений, проведенных в [1] (рис. 2) на базе формулы (7) оценим возможное изменение.

PAR-радиации на земной поверхности из-за флуктуации выражения $f(x_2)$, то есть из-за изменений x_2 и x_1 .

Возможное изменение PAR-радиации на фиксированной длине волны λ_0 определим как:

$$\Delta PAR(\lambda_0) = \int_{x_{2min}}^{x_{2max}} E_{0\lambda_0} \cdot C_{\lambda_0} \times \exp[-m(f(x_2) a_{1\lambda_0} + x_2 a_{2\lambda_0})] dx_2 \quad (10)$$

С учетом выражений (9) и (10) можно сформировать целевой функционал F безусловной вариационной оптимизации:

$$F = \int_{x_{2min}}^{x_{2max}} E_{0\lambda_0} C_{\lambda_0} \exp[-m(f(x_2) a_{1\lambda_0} + x_2 a_{2\lambda_0})] dx_2 + L \left[\int_{x_{2min}}^{x_{2max}} f(x_2) dx_2 - C_1 \right], \quad (11)$$

где L – множитель Лагранжа.

Далее для упрощения записи процедур решения задачи (11) примем $x_{2min} = 0$, а индексы λ_0 не будем указывать, то есть выражение (11) принимает следующий вид:

$$F = \int_0^{x_{2max}} E_0 C \exp[-(mf(x_2) a_1 + x_2 a_2)] dx_2 + L \left[\int_0^{x_{2max}} f(x_2) dx_2 - C_1 \right]. \quad (12)$$

Решение согласно методу Эйлера, удовлетворяет следующему условию:

$$\frac{d\{E_0 C \cdot \exp[-(mf(x_2) a_1 + x_2 a_2) + Lf(x_2)]\}}{df(x_2)} = 0. \quad (13)$$

Из условия (13) получаем:

$$-a_1 E_0 C \cdot \exp[-(mf(x_2)a_1 + x_2 a_2)] + L = 0 \quad (14)$$

или

$$\exp[-(mf(x_2)a_1 + x_2 a_2)] = \frac{L}{a_1 E_0 C}. \quad (15)$$

Логарифмируя выражение (15), получаем:

$$-mf(x_2) = \ln \left[\frac{L}{a_1 E_0 C} \right] - x_2 a_2 \quad (16)$$

или

$$f(x_2) = \frac{1}{m} \cdot \ln \left(\frac{a_1 E_0 C}{L} \right) + \frac{x_2 a_2}{m}. \quad (17)$$

При решении (17) функционал F достигает минимума. Этот факт может быть проверен по признаку Лагранжа, согласно которому, применительно к решенной задаче (12) если производная выражения (14) по искомой функции $f(x_2)$ является положительной величиной, то целевой функционал при полученном решении достигает минимума.

Что касается вычисления L , то для этой чисто математической задачи можно воспользоваться выражениями (9) и (17). Детали соответствующих процедур здесь не приводятся.

При решении (17) функционал F достигает минимума. Этот факт может быть проверен по признаку Лагранжа, согласно которому, применительно к решенной задаче (12) если производная выражения (14) по искомой функции $f(x_2)$ является положительной величиной, то целевой функционал при полученном решении достигает минимума.

Что касается вычисления L , то для этой чисто математической задачи можно воспользоваться выражениями (9) и (17). Детали соответствующих процедур здесь не приводятся.

Обсуждение

Таким образом, в настоящей статье была сформулирована и решена задача выяснения условий, содействующих появле-

нию экстремальных величин фотосинтетически активной части Солнечной оптической радиации (PAR) достигающей Земной поверхности. Очевидно, что решение данной задачи интересен с точки зрения временной последовательности чередования фенологических фаз развития растений. Дело в том, что в начальные месяцы года, то есть зимние месяцы растительность находится в «спячке» и, следовательно, не нуждается в PAR-компоненте Солнечной оптической радиации. Результаты анализа, проведенного в настоящей статье, с привлечением известных экспериментальных результатов, показывают, что минимум PAR-радиации, достигающей земной поверхности подпадает именно в начальные месяцы года, в течение которых между такими ослабляющими Солнечное излучение атмосферными факторами как общее количество озона и аэрозоль существует положительная корреляция. Таким образом, выявляется полная согласованность таких природных процессов как (1) ослабление Солнечной PAR-радиации атмосферным озоном и аэрозолем; и (2) последовательность чередования фенологических фаз развития растительности.

Выводы

1. Определено, что основными атмосферными факторами, приводящими к ослаблению PAR-компоненты Солнечного оптического излучения, являются атмосферный озон и аэрозоль с учетом существенной временной изменчивости этих факторов по месяцам в течение года.

2. Сформулирована и решена задача выявления условий появления экстремума PAR-компоненты Солнечного излучения, доходящего до Земной поверхности во времени.

3. Определено, что экстремум в виде минимума PAR-компоненты Солнечного излучения появляется в первые месяцы (то есть зимой) года, что показывает хорошую согласованность таких природных процессов, как ослабление PAR-компоненты Солнечной радиации и фенология развития растительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Broadband Dependence of Atmospheric Transmissions in the UV and Total Solar Radiation / H. Lee [et al.] // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. – 2019. – Vol. 71, № 1. – P. 1503513. – DOI: <https://doi.org/10.1080/16000889.2018.1503513>
2. Chang, J. H. W. Diurnal Evolution of Solar Radiation in UV, PAR and NIR Bands in High Air Masses / J. H. W. Chang, J. Dayou, J. Sentian // *Nature Environment and Pollution Technology*. – 2013. – Vol. 12, № 1. – P. 1–6.
3. Instrumental Set-Up to Estimate the Atmospheric Attenuation Along the Slant Path of Concentrated Solar Plant / T. Elias [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2033. – P. 190005. – DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5067190>
4. Global Solar Radiation and Its Interactions with Atmospheric Substances and Their Effects on Air Temperature Change in Ankara Province / J. Bai [et al.] // *Climate*. – 2024. – Vol. 12, № 3. – P. 35. – DOI: <https://doi.org/10.3390/cli12030035>
5. Jaïne, D. Total Solar Irradiance Using a Traceable Solar Spectroradiometer / D. Jaïne, J. Gröbner, W. Finsterle // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2025. – Vol. 18, № 24. – P. 7177–7186. – DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-18-7177-2025>
6. Nurick, A. Clear Sky Solar Illuminance Using Visual Band Irradiance / A. Nurick // *Journal of Energy in Southern Africa*. – 2014. – Vol. 25, № 3. – P. 11–19. – DOI: <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2014/V25I3A2653>
7. Paulescu, E. Clear Sky Solar Irradiance Models Derived Through Interdependent Parameterization / E. Paulescu, L. Velimirovici, M. Paulescu // *Renewable Energy*. – 2025. – Vol. 250, № C. – P. 123371. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123371>

REFERENCES

1. Lee H., Kim W., Lee Y.G., Koo J.-H., Jung Y., Park S.S., Cho H.-K., Kim J. Broadband Dependence of Atmospheric Transmissions in the UV and Total Solar Radiation. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2019, vol. 71, no. 1, p. 1503513. DOI: <https://doi.org/10.1080/16000889.2018.1503513>
2. Chang J.H.W., Dayou J., Sentian J. Diurnal Evolution of Solar Radiation in UV, PAR and NIR Bands in High Air Masse. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2013, vol. 12, no. 1, pp. 1-6.
3. Elias T., Ramon D., Bourdil C., Dubus L., Brau J.-F., Langouet H. Instrumental Set-Up to Estimate the Atmospheric Attenuation Along the Slant Path of Concentrated Solar Plant. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2033, p. 190005. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5067190>
4. Bai J., Wan X., Arslan E., Zong X. Global Solar Radiation and Its Interactions with Atmospheric Substances and Their Effects on Air Temperature Change in Ankara Province. *Climate*, 2024, vol. 12, no. 3, p. 35. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli12030035>
5. Jaïne D., Gröbner J., Finsterle W. Finsterle Total Solar Irradiance Using a Traceable Solar Spectroradiometer. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2025, vol. 18, no. 24, pp. 7177-7186. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-18-7177-2025>
6. Nurick A. Clear Sky Solar Illuminance Using Visual Band Irradiance. *Journal of Energy in Southern Africa*, 2014, vol. 25, no. 3, pp. 11-19. DOI: <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2014/V25I3A2653>
7. Paulescu E., Velimirovici L., Paulescu M. Clear Sky Solar Irradiance Models Derived Through Interdependent Parameterization. *Renewable Energy*, 2025, vol. 250, no. C, p. 123371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123371>

Information About the Authors

Hikmat H. oglu Asadov, Candidate of Sciences (Engineering), Professor, Chief Researcher, National Aerospace Agency, S.S. Akhundova St, 1, AZ1115 Baku, Azerbaijan Republic, asadzade@rnbler.ru

Khumar S. kyzy Aliyeva, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Chief Researcher, National Aerospace Agency, S.S. Akhundova St, 1, AZ1115 Baku, Azerbaijan Republic, khumaraliyeva@nasa.az

Ulker F. kyzy Mammadova, Candidate of Sciences (Engineering), Lecturer, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Prosp. Azadlig, 20, AZ1010 Baku, Azerbaijan Republic, ulcer-gasimova@bk.ru

Информация об авторах

Хикмат Гамид оглы Асадов, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Национального аэрокосмического агентства, ул. С.С. Ахундова, 1, AZ1115 г. Баку, Азербайджанская Республика, asadzade@rnbler.ru

Хумар Сабир гызы Алиева, кандидат технических наук, доцент, главный научный сотрудник, Национальное аэрокосмическое агентство, ул. С.С. Ахундова, 1, AZ1115 г. Баку, Азербайджанская Республика, khumaraliyeva@nasa.az

Улькер Физули гызы Маммадова, кандидат технических наук, преподаватель Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности, просп. Азадлыг, 20, AZ1010 г. Баку, Азербайджанская Республика, ulcer-gasimova@bk.ru