

Методы и модели системного анализа

Системный анализ влияния облаков на оценку поступающей на Землю солнечной оптической радиации

Х.Г. Асадов, Н.Ш. Абилова

Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Республика Азербайджан

Аннотация. Сформулирована с позиции системного анализа и решена задача достижения поступления в условиях облачности наибольшего количества солнечной оптической радиации на некоторый ограниченный участок земной поверхности. В соответствии с необходимостью учета динамики анализируемых процессов исследовано требуемое корреляционное соотношение между альбедо облаков и зенитным углом Солнца, при котором на выделенный участок Земли поступит наибольшее количество солнечной радиации. Показано, что максимум поступления солнечной радиации на выделенный участок будет зарегистрирован в случае наличия положительной корреляции между указанными показателями, т.е. в том случае, если рост зенитного угла Солнца сопровождается увеличением альбедо облаков, а уменьшения зенитного угла сопровождается уменьшением указанного альбедо.

Ключевые слова: альбедо, облако, зенитный угол Солнца, оптическая радиация, радиационный баланс.

DOI: 10.14357/20790279250111 **EDN:** FEJTQA

Введение

Точная оценка солнечной оптической радиации на поверхности Земли (SSI-surface solar irradiance) важна для многих отраслей науки и техники, например, для солнечной энергетики, метеорологии, климатологии, земледелия и т.д. Показатель SSI измеряется в Вт/м² и содержит как диффузную, так и прямую составляющую. Изучение SSI проводилось в целях мониторинга радиационного баланса Земли [1-6], для предсказания тепловых волн [7-9], изучения климатических изменений [10-15], предсказания погодных условий [16-19], агрометеорологии [20] и в других целях. Точная оценка SSI требует

охвата широких географических территорий и поэтому в этих целях широко используются спутниковые методы наблюдения и оценки. Например, в этих целях могут быть использованы различные спутники, имеющие кодовые названия METEOSAT, GOES, HIMAWARI и др.

В общем случае SSI, если не учесть эффектов поглощения и рассеяния в атмосфере, зависит от зенитного угла Солнца и идентичен солнечной радиации на верхней поверхности атмосферы. При наличии облаков SSI может быть представлен в виде:

$$SSI = SSI_{clear} \cdot T_{cloud}, \quad (1)$$

где SSI_{clear} – солнечная радиация на поверхности облаков; T_{cloud} – пропускание облаков. SSI_{clear} определяется по формуле:

$$SSI_{clear} = T_{clear} \cdot SSI_{ext} \cdot \cos \theta, \quad (2)$$

где T_{clear} – пропускание чистого неба; θ – зенитный угол Солнца; SSI_{ext} – экстратеррестриальная радиация, определяемая как

$$SSI_{ext} = SSI_{ext \cdot const} \cdot d_{cor}, \quad (3)$$

где $SSI_{ext \cdot const}$ – солнечная постоянная, вычисленная для средней дистанции между Солнцем и Землей, т.е. для случая $d_{cor} = 1$. Общепринято, что $SSI_{ext \cdot const} = 1361 \text{ Вт/м}^2$.

В общем случае, пропускание облаков и отражение облаков (R_{cloud}) связаны:

$$T_{cloud} = 1 - R_{cloud}. \quad (4)$$

Для спутниковой оценки T_{cloud} взамен R_{cloud} используется показатель «эффективное альbedo облако» (CAL – cloud albedo), определяемое как:

$$CAL = \frac{\rho - \rho_{cs}}{\rho_{cal} - \rho_{cs}}, \quad (5)$$

где ρ – нормализованный коэффициент отражения, определяемый как:

$$\rho = \frac{D - D_0}{f \cos \theta}, \quad (6)$$

где D – спутниковые цифровые отсчеты (с учетом темновой составляющей D_0); f – коэффициент, учитывающий изменение расстояние Земля-Солнце; ρ_{cs} – отражение чистого неба.

Следовательно, формула (4) имеет вид:

$$T_{cloud} = 1 - CAL. \quad (7)$$

С учетом выражений (1), (2), (7) получим:

$$SSI = T_{clear} \cdot SSI_{ext} \cos \theta (1 - CAL). \quad (8)$$

Вместе с тем, для облаков с высокой оптической толщиной SSI линейно не зависит от CAL и здесь применяется формула:

$$T_{cloud} = 1,1661 - 1,7814CAL + 0,7250CAL^2. \quad (9)$$

Таким образом, к учету (8) и (9) получаем:

$$SSI = T_{clear} \cdot SSI_{ext} \cos \theta [1,1661 - 1,7814CAL + 0,7250CAL^2] \quad (10)$$

Рассмотренный выше механизм поступления Солнечного излучения на поверхность Земли графически отображен на рис. 1.

Учет зенитного угла спутника осуществляется путем введения специального коэффициента коррекции, зависящего от зенитного угла спутника в виде:

$$CAL_{cor} = CAL k_{cor}(\theta_s). \quad (11)$$

Вместе с тем, согласно принципам системного анализа, изучаемый процесс или объект должен быть рассмотрен не только в статике, но и в динамике. Целью настоящей статьи является исследование условий появления экстремума в суммарном количестве потока оптической радиации поступающей на некоторый ограниченный геометрический участок Земли в условиях изменяющейся степени облачности.

1. Материалы и методы

Допустим, что на некоторый ограниченной участок Земли (x_1, x_2) в течение $t_1 \div t_2$ поступает солнечная радиация (рис. 2). При этом подсчет суммарной оптической радиации на поверхности участка осуществляется в течение промежутка $t_1 \div t_2$ после полудня. В момент t_1 Солнце находится в позиции 1 (рис. 2) а в момент t_2 – в позиции 2.

Динамика рассматриваемого процесса заключается в следующем:

1. Солнце в течение периода $T = t_1 - t_2$ изменяет свой зенитный угол, т.е.

$$\theta = \varphi_1(t); t_1 < t \leq t_2. \quad (12)$$

2. Облака обладают пространственно-временной изменчивостью, т.е.

$$CAL = \varphi_2(t). \quad (13)$$

С учетом выражения (12), (13) можно ввести на рассмотрение неявную функцию:

$$CAL = \psi(\theta). \quad (14)$$

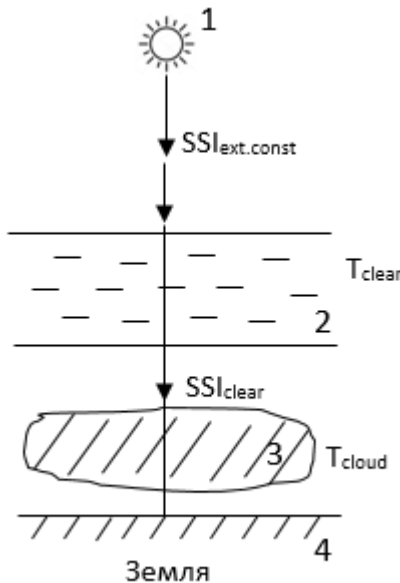


Рис. 1. Геометрическое представление прихода солнечной радиации на поверхность Земли: 1-Солнце; 2-атмосфера; 3-облако; 4-Земля

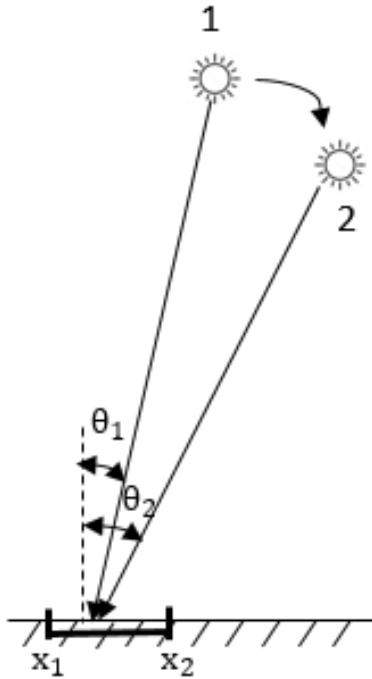


Рис. 2. Схема, отображающая динамику проведения измерений

С учетом вышеизложенного выражение (10) перепишем как:

$$SSI = T_{clear} \cdot SSI_{ext} \cos \theta [1,1661 - 1,7814 \text{CAL}(\theta) + 0,7250 \text{CAL}(\theta)^2] \quad (15)$$

В более компактном виде выражение (15) имеет вид:

$$SSI = a_1 \cos \theta [a_2 - a_3 \psi(\theta) + a_4 \psi^2(\theta)], \quad (16)$$

где $a_1 = T_{clear} \cdot SSI_{ext}$; $a_2 = 1,1661$; $a_3 = 1,7814$; $a_4 = 0,7250$.

На базе выражения (16) составим функционал:

$$F = \int_{\theta_1}^{\theta_2} SSI d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} a_1 \cos \theta [a_2 - a_3 \psi(\theta) + a_4 \psi^2(\theta)] d\theta \quad (17)$$

Для поиска функции $\psi(\theta)$, приводящей функционал F к экстремальной величине к этой функции, приложим следующее ограничительное условие:

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \psi(\theta) d\theta = C; C = \text{const}. \quad (18)$$

Геометрическая интерпретация условия (18) показана на рис. 3.

С учетом выражений (17) и (18) составим целевой функционал F_0 безусловной вариационной оптимизации:

$$F_0 = \int_{\theta_1}^{\theta_2} a_1 \cos \theta [a_2 - a_3 \psi(\theta) + a_4 \psi^2(\theta)] d\theta + \lambda \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} \psi(\theta) d\theta - C \right], \quad (19)$$

где λ -множитель Лагранжа.

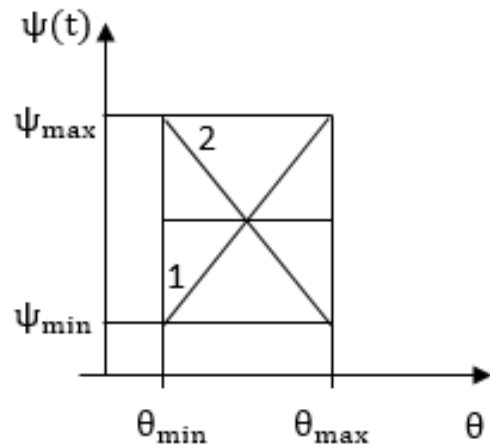


Рис. 3. Геометрическая интерпретация условия (18): 1-случай, когда CAL растет с ростом θ ; 2-случай, когда CAL убывает с ростом θ

Решение оптимизационной задачи (19) согласно методу Эйлера удовлетворяет следующему условию:

$$\frac{d\{a_1 \cos \theta [a_2 - a_3 \psi(\theta) + a_4 \psi^2(\theta)] + \lambda \psi(\theta)\}}{d\psi(\theta)} = 0. \quad (20)$$

Из условия (20) получаем:

$$-(\cos \theta) a_3 + a_4 \psi(\theta) + \lambda = 0. \quad (21)$$

Из выражения (21) получаем:

$$\psi(\theta) = \frac{-\lambda + a_3 \cos \theta}{a_4}. \quad (22)$$

С учетом выражений (18) и (22) запишем:

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[\frac{-\lambda + a_3 \cos \theta}{a_4} \right] d\theta = C. \quad (23)$$

Из равенства (23) находим если $\int_{\theta_1}^{\theta_2} a_1 \cos \theta d\theta = \sin \theta$.

$$-\frac{\lambda}{a_4} (\theta_2 - \theta_1) + \frac{a_3}{a_4} (\Delta \sin \theta) = C, \quad (24)$$

где $\Delta \sin \theta = \sin \theta_2 - \sin \theta_1$.

Из выражения (24) получим:

$$\lambda = \frac{\left(\frac{a_3}{a_4} \Delta \sin \theta - C \right) a_4}{\theta_2 - \theta_1}. \quad (25)$$

Таким образом, с учетом выражений (22) и (25) получим:

$$\psi(\theta) = \frac{\left(\frac{a_3}{a_4} \Delta \sin \theta \right)}{\theta_2 - \theta_1} + \frac{a_3 \cos \theta}{a_4}. \quad (26)$$

При условии (26) функционал F_0 достигает минимума, т.к. производная выражения (21) всегда оказывается положительной величиной.

Следовательно, на основании решения (26) можно заключить, что если происходит рост зенитного угла Солнца θ_1 до θ_2 и за это время происхо-

дит уменьшение CAL , то участок (x_1, x_2) на земле получает минимальное количество солнечной оптической радиации, т.е. линия 2 (рис. 3) отображает наихудший сценарий процесса. Очевидно, что альтернативой к этому сценарию является сценарий 1 (рис. 3), когда рост θ сопровождается увеличением CAL .

2. Обсуждение

Таким образом, с позиции системного анализа проанализирован вопрос о влиянии облаков на суммарное количество оптического солнечного радиационного потока, поступающего на ограниченный участок земной поверхности за период $t_1 - t_2$, в течение которого зенитный угол Солнца изменяется на величину $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$. В соответствии с базовыми принципами системного анализа задача решается с учетом всей динамики рассматриваемого процесса, т.е. с учетом пространственно-временной изменчивости отражательных свойств облаков над рассматриваемым участком на земной поверхности. Решение задачи сведено к дуальному случаю, т.е. требуется определить при каком виде зависимости альbedo облаков от зенитного угла Солнца поступление солнечной оптической радиации достигнет экстремума: рост зенитного угла сопровождается ростом альbedo облаков; рост зенитного угла сопровождается уменьшением альbedo облаков. Решение данной задачи показало, что наиболее предпочтительным оказывается первый вариант, т.к. второй вариант приводит к минимуму поступающей солнечной радиации.

Заключение

Сформулирована с позиции системного анализа и решена задача выяснения условия поступления наибольшего количества солнечной оптической радиации на ограниченный участок земной поверхности в условиях облачности. В соответствии с базовым принципом учета динамики анализируемых процессов показано, что наибольшее количество солнечной радиации поступит на участок в том случае, если рост зенитного угла Солнца сопровождается увеличением альbedo облаков, а уменьшение зенитного угла сопровождается уменьшением альbedo.

Литература

1. Hollman R., Muller R.W., Gratzki A. CM-SAF surface radiation budget: first result with AVHRR data// Adv. Space. Res. 37. 2006.

2. Mueller R., Matsousak C., Gratzki A., Hollman R., Behr H. The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance – a LUT based eigenvector hybrid approach// Remote sens. Environ. 113. 1012-1024. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.012>. 2009
3. Harries J., Russel J., Hanafin J., Brindley H., Futyran J. et al. The geostationary earth radiation budget project// BAMS. 86. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-7-945>. 2005.
4. Carrer D., Ceamanos X., Moparthy S., Vincent C., Freitas C. and Trigo I.F. Satellite Retrieval of Downwelling Shortwave Surface Flux and Diffuse Fraction under All Sky Conditions in the Framework of the LSA SAF Program (Part 1: Methodology), Remote Sens., 11, 2523, <https://doi.org/10.3390/rs11212532>, 2019
5. Bugliaro L., Piontek D., Kox S., Schmidl M., Mayer B., Müller R., Vázquez-Navarro M., Peters D.M., Grainger R.G., Gasteiger J., and Kar J. Combining radiative transfer calculations and a neural network for the remote sensing of volcanic ash using MSG/SEVIRI, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/nhess-2021-270>, in review. 2021.
6. Alexandri G., Georgoulas A., and Balis D. Effect of Aerosols, Tropospheric NO₂ and Clouds on Surface Solar Radiation over the Eastern Mediterranean (Greece), Remote Sens., 13, 2587, <https://doi.org/10.3390/rs13132587>. 2021.
7. Trager-Chatterjee C., Muller R., Bendix J. Analysis of extreme summers and prior late winter/spring conditions in central Europe// Natural hazards and earth system sciences. 13. 1243-1257. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1243-2013>. 2013.
8. Hermann M., Papritz L. & Wernli H. A Lagrangian analysis of the dynamical and thermodynamic drivers of large-scale Greenland melt events during 1979–2017. Weather Clim. Dyn. 1, 497–518 (2020).
9. Turner J. et al. An extreme high temperature event in coastal east Antarctica associated with an atmospheric river and record summer downslope winds. Geophys. Res. Lett. 49, e2021GL097108 (2022).
10. Wild M. Global dimming and brightening: a review// Journal of geophysical research. 114. <https://doi.org/10.1029/2008JD011470>. 2009.
11. Gilgen H., Roesch A., Wild M., Ohmura A. Decadal changes in shortwave irradiance at the surface in the period from 1960 to 2000 estimated from Global energy balance archive data// Journal of geophysical research. 114. <https://doi.org/10.1029/2008JD011383>. 2009.

12. *Baker A.J., Hodges K.I., Schiemann R.K. and Vidale P.L.* Historical variability and lifecycles of North Atlantic midlatitude cyclones originating in the tropics, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD033 924, 2021.
13. *Berkovic S. and Raveh-Rubin S.* Persistent warm and dry extremes over the eastern Mediterranean during winter: The role of North Atlantic blocking and central Mediterranean cyclones, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148, 2384–2409, 2022.
14. *Casson N., Contosta A., Burakowski E., Campbell J., Crandall M., Creed I., Eimers M., Garlick S., Lutz D., Morison M. et al.* Winter weather whiplash: Impacts of meteorological events misaligned with natural and human Systems in Seasonally Snow-Covered Regions, *Earth's Future*, 7, 1434–1450, 2019.
15. *Faranda D., Alvarez-Castro M.C., Messori G., Rodrigues D. and You P.* The hammam effect or how a warm ocean enhances large scale 950 atmospheric predictability, *Nature communications*, 10, 1–7, 2019
16. *Urbich I., Bendix J., Muller R.* The seamless solar radiation (SESORA) forecast for solar surface irradiance method and validation// *Remote sensing*. 11. <https://doi.org/10.3390/rs11212576>. 2019.
17. *Urbich I., Bendix J., Muller R.* Development of a seamless forecast for solar radiation using ANAKLIM++// *Remote Sensing*. 12. <https://doi.org/10.3390/rs12213672>. 2020.
18. *Yucel I., Onen A., Yilmaz K., and Gochis D.J.* 2015: Calibration and evaluation of a flood forecasting system: Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall. *J. Hydrol.*, 523, 49–66, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.01.042.
19. *Zambon J.B., He R. and Warner J.C.* 2014: Investigation of Hurricane Ivan using the coupled ocean–atmosphere–wave–sediment transport (COAWST) model. *Ocean Dyn.*, 64, 1535–1554, doi:10.1007/s10236-014-0777-7.
20. *Muller R.W.* Agrar meteorology and radiation// *Encyclopedia of sustainability science and technology*. 978-1-4419-0852-0. 2021.

Асадов Хикмет Гамид оглы. НИИ Аэрокосмической информатики Национального Аэрокосмического Агентства, г. Баку, Республика Азербайджан. Начальник отдела. Доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: информационно-измерительные системы, системный анализ, дистанционное зондирование, экология. E-mail: asadzade@rambler.ru (ответственный за переписку)

Абилова Наргиз Шамил гызы. НИИ Аэрокосмической информатики Национального Аэрокосмического Агентства, г. Баку, Республика Азербайджан. Зам. начальника отдела. Докторант (аспирант). Область научных интересов: информационно-измерительные системы, системный анализ, дистанционное зондирование, экология. E-mail: nergiz.ebilova36@gmail.com

System analysis of the influence of clouds on the assessment of solar optical radiation arriving at the earth

H.H. Asadov, N.S. Abilova

National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

Abstract. The problem of achieving the receipt of the largest amount of solar optical radiation to a certain limited area of the Earth's surface in cloudy conditions is formulated from the standpoint of system analysis and solved. In accordance with the need to take into account the dynamics of the analyzed processes, the required correlation between the albedo of clouds and the zenith angle of the Sun, at which the largest amount of solar radiation will enter the selected area of the Earth, is investigated. It is shown that the maximum intake of solar radiation to the selected area will be recorded if there is a positive correlation between these indicators, i.e. if an increase in the zenith angle of the Sun is accompanied by an increase in the albedo of clouds, and a decrease in the zenith angle is accompanied by a decrease in the specified albedo.

Keywords: *albedo, cloud, zenith angle of the Sun, optical radiation, radiation balance*

DOI: 10.14357/20790279250111 **EDN:** FEJTQA

References

1. Hollman R., Muller R.W., Gratzki A. CM-SAF surface radiation budget: first result with AVHRR data// Adv. Space. Res. 37. 2006.
2. Mueller R., Matsousak C., Gratzki A., Hollman R., Behr H. The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance – a LUT based eigenvector hybrid approach// Remote sens. Environ. 113. 1012-1024. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.012>. 2009
3. Harries J., Russel J., Hanafin J., Brindley H., Futyran J. et al. The geostationary earth radiation budget project// BAMS. 86. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-7-945>. 2005.
4. Carrer D., Ceamanos X., Moparthy S., Vincent C., Freitas C. and Trigo I.F. Satellite Retrieval of Downwelling Shortwave Surface Flux and Diffuse Fraction under All Sky Conditions in the Framework of the LSA SAF Program (Part 1: Methodology), Remote Sens., 11, 2523, <https://doi.org/10.3390/rs11212532>, 2019
5. Bugliaro L., Piontek D., Kox S., Schmidl M., Mayer B., Müller R., Vázquez-Navarro M., Peters D.M., Grainger R.G., Gasteiger J., and Kar J. Combining radiative transfer calculations and a neural network for the remote sensing of volcanic ash using MSG/SEVIRI, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/nhess-2021-270>, in review, 2021.
6. Alexandri G., Georgoulas A., and Balis D. Effect of Aerosols, Tropospheric NO₂ and Clouds on Surface Solar Radiation over the Eastern Mediterranean (Greece), Remote Sens., 13, 2587, <https://doi.org/10.3390/rs13132587>, 2021.
7. Trager-Chatterjee C., Muller R., Bendix J. Analysis of extreme summers and prior late winter/spring conditions in central Europe// Natural hazards and earth system sciences. 13. 1243-1257. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1243-2013>. 2013.
8. Hermann M., Papritz L. & Wernli H. A Lagrangian analysis of the dynamical and thermodynamic drivers of large-scale Greenland melt events during 1979–2017. Weather Clim. Dyn. 1, 497–518 (2020).
9. Turner J. et al. An extreme high temperature event in coastal east Antarctica associated with an atmospheric river and record summer downslope winds. Geophys. Res. Lett. 49, e2021GL097108 (2022).
10. Wild M. Global dimming and brightening: a review// Journal of geophysical research. 114. <https://doi.org/10.1029/2008JD011470>. 2009.
11. Gilgen H., Roesch A., Wild M., Ohmura A. Decadal changes in shortwave irradiance at the surface in the period from 1960 to 2000 estimated from Global energy balance archive data// Journal of geophysical research. 114. <https://doi.org/10.1029/2008JD011383>. 2009.
12. Baker A.J., Hodges K.I., Schiemann R.K. and Vidale P.L. Historical variability and lifecycles of North Atlantic midlatitude cyclones originating in the tropics, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126, e2020JD033 924, 2021.
13. Berkovic S. and Raveh-Rubin S. Persistent warm and dry extremes over the eastern Mediterranean during winter: The role of North Atlantic blocking and central Mediterranean cyclones, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 148, 2384–2409, 2022.
14. Casson N., Contosta A., Burakowski E., Campbell J., Crandall M., Creed I., Eimers M., Garlick S., Lutz D., Morison M. et al. Winter weather whiplash: Impacts of meteorological events

- misaligned with natural and human Systems in Seasonally Snow-Covered Regions, *Earth's Future*, 7, 1434–1450, 2019.
15. *Faranda D., Alvarez-Castro M.C., Messori G., Rodrigues D. and Yiou P.* The hammam effect or how a warm ocean enhances large scale 950 atmospheric predictability, *Nature communications*, 10, 1–7, 2019.
16. *Urbich I., Bendix J., Muller R.* The seamless solar radiation (SESORA) forecast for solar surface irradiance method and validation// *Remote sensing*. 11. <https://doi.org/10.3390/rs11212576>. 2019.
17. *Urbich I., Bendix J., Muller R.* Development of a seamless forecast for solar radiation using ANAKLIM++// *Remote Sensing*. 12. <https://doi.org/10.3390/rs12213672>. 2020.
18. *Yucel I., Onen A., Yilmaz K., and Gochis D.J.* 2015: Calibration and evaluation of a flood forecasting system: Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall. *J. Hydrol.*, 523, 49–66, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.01.042.
19. *Zambon J.B., He R. and Warner J.C.* 2014: Investigation of Hurricane Ivan using the coupled ocean–atmosphere–wave–sediment transport (COAWST) model. *Ocean Dyn.*, 64, 1535–1554, doi:10.1007/s10236-014-0777-7.
20. *Muller R.W.* Agrar meteorology and radiation// *Encyclopedia of sustainability science and technology*. 978-1-4419-0852-0. 2021.

Asadov Hikmet Hamid oglu Research Institute of Aerospace Informatics of the National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. The head of the department. Doctor of Technical Sciences, Professor. Research interests: information and measurement systems, system analysis, remote sensing, ecology. E-mail: asadzade@rambler.ru (responsible for correspondence)

Abilova Nargiz Shamil gizi Research Institute of Aerospace Informatics of the National Aerocomic Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. Deputy. the head of the department. Doctoral student (post-graduate student). Research interests: information and measurement systems, system analysis, remote sensing, ecology. E-mail: nergiz.ebilova36@gmail.com