

УДК 523.745+551.5

ВОЗМОЖНОЕ ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ПЛАНЕТАРНОЕ АЛЬБЕДО ЗЕМЛИ

© 2023 г. М. Б. Богданов¹, *, М. Ю. Червяков¹, **, А. А. Кошель¹, ***

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

*e-mail: BogdanovMB@info.sgu.ru

**e-mail: chervyakovmu@mail.ru

***e-mail: kafmeteo@mail.ru

Поступила в редакцию 20.06.2022 г.

После доработки 02.09.2022 г.

Принята к публикации 22.09.2022 г.

По результатам измерений потока коротковолновой отраженной солнечной радиации, проведенных с борта ИСЗ “Метеор – М” № 2 в 2014–2019 гг., получены среднемесячные значения планетарного альbedo на верхней границе атмосферы Земли и значения средних альbedo полушарий. Глобально осредненное альbedo демонстрирует увеличение со временем, подтверждаемое наличием статистически значимого линейного тренда. Показано, что этот тренд не связан с изменением средней приповерхностной температуры планеты. Возможно, что повышение альbedo объясняется увеличением облачности, вызванным ростом потока галактических космических лучей на спаде цикла солнечной активности.

DOI: 10.31857/S0016794022600570, EDN: ADEYAK

1. ВВЕДЕНИЕ

Наряду с изменением солнечной постоянной, вероятным путем воздействия солнечной активности на тропосферные процессы и климат является модуляция потока галактических космических лучей (ГКЛ), способных проникать глубоко в атмосферу, вплоть до поверхности Земли [Pudovkin and Veretenenko, 1996; Крымский, 2002; Распопов и Веретененко, 2009; Gray et al., 2010; Mironova et al., 2015]. Вопрос о конкретных механизмах воздействия ГКЛ на атмосферу все еще остается открытым. После сообщения о наличии высокой положительной корреляции плотности нижней облачности с потоком ГКЛ [Marsh and Svensmark, 2000] привлек к себе внимание конденсационный механизм, обусловленный появлением заряженных частиц аэрозоля, играющих роль ядер конденсации при формировании облаков. Хотя дальнейшие наблюдения показали нарушения этой корреляции [Gray et al., 2010; Laken and Čalogović, 2013], данный механизм исследовался также в CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) в ходе специального эксперимента CLOUD (Cosmics Leaving Outdoor Droplets) с использованием протонов высокой энергии [Almeida et al., 2013]. Рассматривались и другие возможные механизмы влияния ГКЛ на атмосферные процессы [Кондратьев и Никольский, 1995; Авакян и Воронин,

2006; Жеребцов и Коваленко, 2012; Крымский и др., 2015; Mironova et al., 2015].

Возможность воздействия ГКЛ на состояние облачности должна проявить себя в изменениях альbedo. Поскольку, как и другие факторы солнечной активности, вариация потока ГКЛ имеет глобальный характер ее влияние легче обнаружить при анализе среднего планетарного альbedo Земли, получаемого по данным спутниковых наблюдений. Недавно заверченный ряд измерений потока отраженной солнечной радиации с борта ИСЗ “Метеор – М” № 2 в 2014–2019 гг. позволил нам получить среднемесячные значения глобально осредненного альbedo на верхней границе атмосферы (ВГА) и среднего альbedo полушарий.

Целью данной работы является исследование изменений альbedo Земли и их возможной связи с глобальной температурой и вариацией потока ГКЛ.

2. КОСМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ АЛЬБЕДО

В состав гелиогеофизического аппаратного комплекса ИСЗ “Метеор-М” № 2 входил измеритель потока коротковолновой отраженной солнечной радиации ИКОР-М, разработанный в Саратовском университете под руководством проф. Ю.А. Склярова (1931–2014). Прибор был постоянно направлен в нади́р, каждую секунду

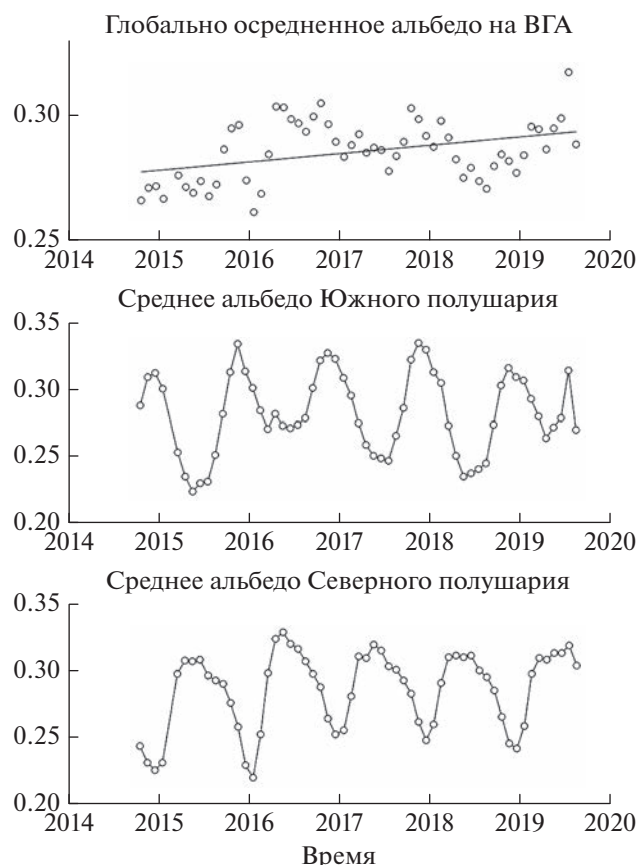


Рис. 1. Среднемесячные значения альbedo на верхней границе атмосферы (кружки). Сплошной прямой линией показан линейный тренд глобально осредненного альbedo.

регистировал поток излучения в диапазоне длин волн 0.3–4.0 мкм и имел угловой радиус поля зрения 30°. По данным этих измерений могут быть оценены значения альbedo на ВГА и величины потоков поглощенной солнечной радиации. Подробное описание измерителя приведено в работе [Скляр и др., 2012a], а методика обработки результатов наблюдений изложена в статье [Скляр и др., 2012b].

Регистрация потока отраженной солнечной радиации проводилась с октября 2014 г. до конца августа 2019 г., с единственным пропуском в феврале 2015 г. Для представления полученных результатов вся поверхность ВГА разделялась на 72 зоны шириной 2.5°, а каждая зона — на ячейки.левой границей первой ячейки каждой зоны является меридиан с долготой 180°. Число ячеек в зонах, примыкающих к экватору равно 144 и их размеры составляют 2.5° × 2.5°. При удалении к полюсам числа ячеек в зонах выбирались целыми так, чтобы их площади оставались приблизительно одинаковыми. Карты глобальных распределений на ВГА среднемесячных значений альbedo,

потоков уходящей коротковолновой и поглощенной солнечной радиации оперативно выкладывались на странице Лаборатории исследования составляющих радиационного баланса Земли Саратовского университета в сети Интернет (<https://www.sgu.ru/structure/geographic/metclim/balans>).

Особое внимание было уделено контролю стабильности измерителя ИКОР-М, результаты которого приведены в работе [Богданов и др., 2022]. Для этого были выбраны среднемесячные значения альbedo ячеек сетки, расположенных над двумя бесснежными пустынями Южного полушария (Атакама и Намиб) и двумя такими же пустынями Северного полушария (Аравия и Сахара). За все время наблюдений эти значения представлялись линейными трендами, для которых оценивались коэффициенты детерминации R^2 . Применение критерия Фишера показало, что во всех четырех случаях гипотеза об отсутствии тренда ($R^2 = 0$) не может быть отвергнута на любом из обычно используемых уровней значимости. Таким образом, чувствительность измерителя в период проведения наблюдений была неизменной.

3. НАБЛЮДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ АЛЬБЕДО

Для расчета глобально осредненных значений альbedo на ВГА $a(t)$ и средних альbedo полушарий Земли было использовано 58 карт распределения его среднемесячных величин. При этом для каждого месяца определялись средневзвешенные значения альbedo с весами, равными площадям ячеек. Полученные результаты показаны кружками на рис. 1.

Прежде всего, заметны большие сезонные изменения средних альbedo полушарий. Они происходят в противофазе, причем максимумы приходятся на летние сезоны соответствующего полушария. Эти изменения в значительной степени компенсируют друг друга так, что глобальное альbedo Земли $a(t)$ меняется существенно меньше.

Наблюдаемые сезонные изменения альbedo полушарий обусловлены, главным образом, изменениями облачности. С началом летнего сезона соответствующего полушария увеличение инсоляции вызывает повышение приповерхностной температуры атмосферы. В соответствии с известной формулой Мангуса это приводит к повышению давления насыщенного водяного пара и увеличению влагосодержания воздуха. Конвективные движения поднимают воздух в область низкой температуры, где, при наличии ядер конденсации, формируется облачность с высоким значением альbedo. В роли ядер конденсации обычно выступают частицы аэрозоля морской соли. Очевидно, что изменение концентрации или появление других видов ядер конденсации способно повлиять на формирование облачности. Опреде-

ленный вклад в сезонные изменения альbedo полушарий вносят также изменения снежного покрова и растительности.

Достаточно важным является вопрос о погрешности полученных значений альbedo. Дисперсия отклонений альbedo ячеек от средневзвешенного значения дает стандартные отклонения среднемесячных величин $a(t)$ в интервале от 0.0009 до 0.0014, что меньше размеров кружка на рис. 1. Однако такая оценка не учитывает погрешности методики расчета альbedo, а также погрешность наземной калибровки прибора и фактически имеет характер нижнего предела.

Оценка реальной погрешности может быть получена при сравнении с результатами независимых космических экспериментов. По данным проекта CERES (Clouds and Earth Radiant Energy System) [Smith et al., 2011] среднее значение планетарного альbedo Земли принимается равным 0.29 [Stephens et al., 2015]. Наша оценка среднего глобального альbedo за время наблюдений в 2014–2019 гг. составляет 0.286 ± 0.003 . Такое хорошее соответствие результатов свидетельствует об отсутствии заметного влияния погрешностей методики расчета и наземной калибровки прибора.

Анализ поведения значений глобального альbedo демонстрирует наличие регулярного увеличения $a(t)$ со временем t . В первом приближении его можно представить линейным трендом, коэффициенты которого были найдены методом наименьших квадратов. Этот тренд показан сплошной прямой линией на верхней панели рис. 1. Коэффициент детерминации для тренда $R^2 = 0.154$. Известно, что случайная величина

$$F(k-1, n-k) = \frac{R^2}{1-R^2} \frac{n-k}{k-1},$$

где k – число параметров модели (в случае линейного тренда $k = 2$), а n – объем выборки, имеет распределение Фишера с числами степеней свободы равными $k-1$ и $n-k$. Гипотеза отсутствия статистически значимого тренда соответствует случаю $R^2 = 0$. Эта гипотеза отвергается на уровне значимости α при выполнении неравенства $F > F_c(\alpha, k-1, n-k)$. В нашем случае значение критерия Фишера $F = 10.3$, а критическое значение критерия для уровня значимости $\alpha = 0.01$ и объема выборки $n = 58$ равно $F_c = 7.10$. Поскольку $F > F_c$, гипотеза отсутствия тренда отвергается с вероятностью 0.99.

Угловой коэффициент линейного тренда альbedo равен 0.0033 ± 0.0010 год⁻¹ и слишком велик для представления его реальных изменений на больших интервалах времени. Наши наблюдения охватывают период около пяти лет и возможно они показывают только часть некоторого циклического процесса, при котором наблюдаемый

рост альbedo должен будет смениться его уменьшением.

Регулярное увеличение со временем среднего значения демонстрируют и альbedo полушарий. Наличие больших сезонных изменений не позволяет применить статистические критерии, предполагающие нормальность распределения. Тем не менее, подобный ход альbedo полушарий хорошо заметен на рис. 1. Это свидетельствует о том, что причина, вызывающая рост альbedo за время наблюдений, имеет глобальный характер.

4. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ РОСТА АЛЬБЕДО

Прежде всего, возникает желание связать наблюдаемое изменение $a(t)$ с глобальным потеплением климата. Как было отмечено выше, при увеличении средней приповерхностной температуры должно возрастать испарение воды и повышаться влагосодержание атмосферы Земли. Этот процесс благоприятствует формированию дополнительной облачности и соответствующему увеличению альbedo.

Для сопоставления с нашими результатами мы использовали ряд среднемесячных значений аномалии глобальной температуры HadCRUT5.0 [Morice et al., 2021]. Эти значения показаны кружками на рис. 2. Видно, что на интервале времени наших наблюдений происходило как увеличение, так и уменьшение аномалии глобальной температуры. Попытка представления данных линейным трендом, показанным на рисунке сплошной линией, дает коэффициент детерминации $R^2 = 0.0026$. Тренд не является статистически значимым, а его угловой коэффициент -0.005 ± 0.012 год⁻¹ формально даже имеет отрицательный знак. Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдаемое увеличение $a(t)$ не связано с глобальным изменением климата. Необходимо искать другой фактор, влияющий на альbedo обоих полушарий планеты.

Как отмечалось во введении, таким фактором могут являться ГКЛ. Известно, что поток ГКЛ меняется в противофазе с солнечной активностью. Интервал наших наблюдений приходился на спадающую ветвь 24-го цикла, который по данным Solar Influences Data Analysis Center, закончился в декабре 2019 г. Этот спад активности Солнца должен был сопровождаться ростом потока ГКЛ. При условии реальности конденсационного механизма это должно приводить к увеличению облачности, вносящей основной вклад в альbedo.

Изменения потока ГКЛ в различных точках поверхности Земли демонстрируют высокую положительную корреляцию. Поэтому для сопоставления с изменениями $a(t)$ можно выбрать

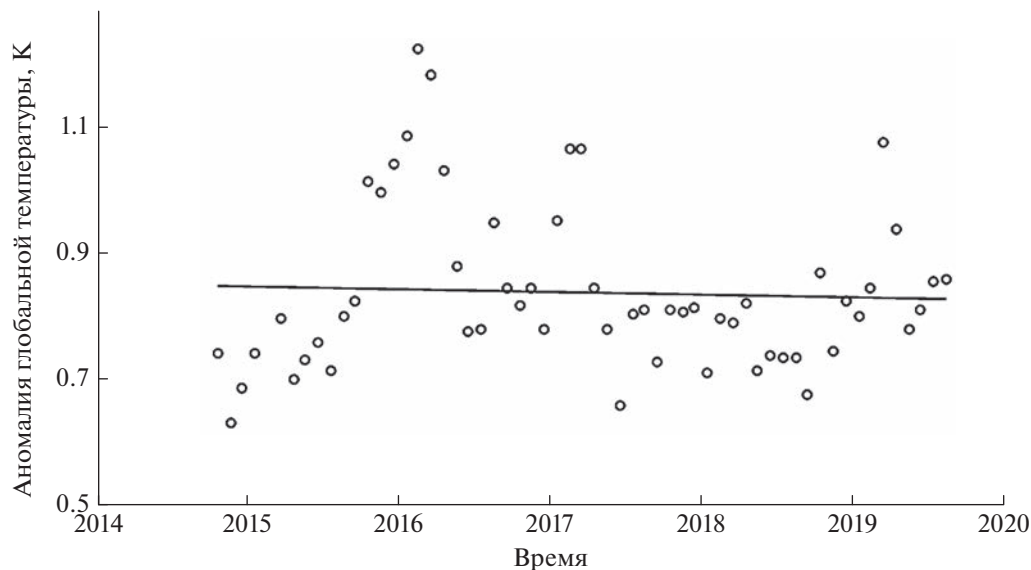


Рис. 2. Среднемесячные значения аномалии глобально осредненной приповерхностной температуры (кружки). Сплошной прямой линией показан линейный тренд.

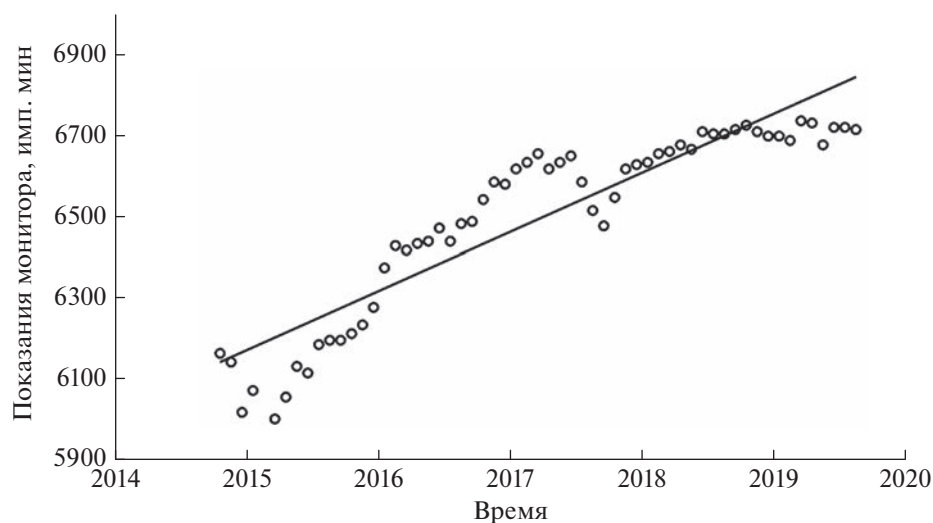


Рис. 3. Среднемесячные значения показаний нейтронного монитора станции Оулу (кружки). Сплошной прямой линией показан линейный тренд.

данные любой станции, входящей в сеть их регистрации. Мы использовали среднемесячные значения показаний нейтронного монитора (в импульсах за минуту) ст. Оулу (Финляндия; 65.05° N ; 25.47° E ; высота над уровнем моря 15 м; эффективная жесткость геомагнитного обрезания 0.8 ГэВ). Эти значения показаны кружками на рис. 3. Сплошной линией на рисунке проведен линейный тренд, коэффициент детерминации для которого $R^2 = 0.843$. Тренд достаточно хорошо описывает возрастание потока ГКЛ и является статистически значимым на уровне $\alpha = 0.01$.

Для оценки связи глобального альбеда $a(t)$ с потоком ГКЛ был рассчитан коэффициент линейной корреляции, оказавшийся равным $R = 0.44$. Случайная величина

$$t(n-2) = \frac{R\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}},$$

где $n = 58$ — объем выборки, имеет распределение Стьюдента с числом степеней свободы $n - 2$. В нашем случае ее значение равно $t = 3.66$. Для уровня значимости $\alpha = 0.01$ критическое значение крите-

рия $t_c = 2.39$. Поскольку $t > t_c$, то гипотеза об отсутствии корреляции отвергается с вероятностью 0.99.

Положительная корреляция сохраняется и для отклонений значений глобального альbedo и потока ГКЛ от соответствующих линейных трендов. При этом коэффициент корреляции оказывается равным $R = 0.22$ со значением критерия Стьюдента $t = 1.69$. Гипотеза $R = 0$ отвергается с вероятностью 0.95.

Представляет интерес исследовать возможность сезонных изменений влияния ГКЛ на альbedo полушарий. Нами были выполнены оценки коэффициентов корреляции средних альbedo полушарий с потоком ГКЛ, давшие для летних сезонов (июнь—август для Северного полушария и декабрь—февраль для Южного полушария) значения $R_{NH} = 0.29$ и $R_{SH} = 0.06$ соответственно. В летние сезоны корреляция статистически значимо не отличается от нуля (вероятность отличия от нуля менее 0.90). В зимние сезоны (декабрь—февраль для Северного полушария и июнь—август для Южного полушария) коэффициенты корреляции статистически значимы на уровнях $\alpha = 0.01$ и $\alpha = 0.10$ соответственно и равны $R_{NH} = 0.69$ для Северного полушария и $R_{SH} = 0.38$ для Южного полушария. Данный результат согласуется с выводами предыдущих исследований о том, что влияние факторов солнечной активности на тропосферные процессы является более заметным в зимние сезоны.

Плотность облачности является главным фактором, влияющим на величину альbedo, но не единственным. Свой вклад вносят также изменения подстилающей поверхности, связанные с состоянием снежного и растительного покрова. Снег, выпадающий и достаточно долго задерживающийся на большой площади поверхности материков Северного полушария, имеет высокое альbedo. В Южном полушарии площадь снежного покрова практически полностью определяется Антарктидой и испытывает малые сезонные изменения. Появление листвы на деревьях и изменения сельскохозяйственных растений в ходе вегетационного периода на больших площадях обрабатываемых земель также сопровождаются заметными флуктуациями альbedo. Все эти факторы увеличивают дисперсию потока отраженной коротковолновой солнечной радиации, но не зависят от влияния ГКЛ. В результате коэффициент корреляции глобально осредненного альbedo с потоком ГКЛ должен уменьшиться. С учетом данного обстоятельства и результатов статистических тестов найденная положительная корреляция может считаться достаточно реальной.

Представляется важным сравнить полученные нами данные об изменении $a(t)$ с независимыми оценками глобального альbedo. К сожалению, возможности такого сравнения достаточно огра-

ничены. Упомянутый выше космический эксперимент CERES имеет целью изучение радиационного баланса Земли путем измерения потоков прямой солнечной радиации, отраженного коротковолнового и уходящего длинноволнового излучения. В статье [Loeb et al., 2018] приведен график аномалии среднемесячных значений глобально осредненного потока отраженной коротковолновой радиации на ВГА с марта 2000 г. по сентябрь 2017 г. Этот поток зависит не только от альbedo, но и от расстояния между Землей и Солнцем, а также от величины солнечной постоянной. С конца 2014 г. наблюдалось уменьшение аномалии потока от нуля до величины -2.0 Вт/м^2 в январе 2017 г., сменившееся резким подъемом к нулевому значению в июне 2017 г.

Существует также возможность оценки глобального альbedo по наблюдениям пепельного света Луны. Хотя эти данные имеют довольно большую погрешность, они не зависимы от космических экспериментов. В работе [Goode et al., 2021] приводится график аномалии среднегодовых значений альbedo в 1998–2017 гг. На интервале времени, охватываемом нашими наблюдениями, значения аномалии близки к нулю и, в пределах погрешности, не показывают заметных изменений.

В отчете [Blunden and Boyer, 2022] представлены данные о глобально осредненной облачности по измерениям прибора MODIS на ИСЗ “Aqua”. На приведенном графике среднемесячных значений аномалии облачности в период наших наблюдений замечен возрастающий линейный тренд.

По данным европейской исследовательской организации, изучающей изменения климата на базе космических наблюдений Satellite Application Facility on Climate Monitoring [Karlssohn et al., 2020], с октября 2014 по июнь 2019 г. произошло увеличение средней глобальной площади облачности приблизительно на 1%. Таким образом, опубликованные данные о состоянии облачности не противоречат нашему предположению об увеличении планетарного альbedo на спаде солнечной активности.

5. ВЫВОДЫ

Данные космических измерений потока отраженной солнечной коротковолновой радиации позволили получить надежные среднемесячные значения глобально осредненного альbedo Земли и среднего альbedo полушарий. Все эти величины, осредненные за время наблюдений в 2014–2019 гг., хорошо совпадают с результатами независимого космического эксперимента CERES. Вместе с тем, глобальное альbedo и альbedo полушарий демонстрируют медленное увеличение со временем. Показано, что в изменении глобального альbedo присутствует статистически значимый

линейный тренд, существование которого нельзя объяснить эффектом старения измерительной аппаратуры. Вероятно, что данный тренд отражает происшедшее в указанный период увеличение облачного покрова Земли.

Увеличение облачности может быть следствием повышения влагосодержания атмосферы, ожидаемого при глобальном потеплении. Однако проведенный анализ показал, что тренд планетарного альbedo не связан с глобальным изменением климата. В среднемесячных значениях аномалии глобально осредненной приповерхностной температуры за интервал времени наблюдений линейный тренд не является статистически значимым, а его угловой коэффициент даже имеет отрицательный знак.

Возможно, что повышение альbedo объясняется увеличением облачности, вызванным ростом потока ГКЛ на спаде 24-го цикла солнечной активности. Это предположение подтверждается наличием статистически значимой положительной корреляции между временными рядами среднемесячных значений соответствующих величин.

Программа космических измерений составляющих радиационного баланса Земли, проводившаяся в Саратовском университете, завершена. Для подтверждения влияния на величину глобального альbedo факторов солнечной активности необходимы дальнейшие исследования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Основная заслуга в создании радиометра ИКОР-М и проведении космических экспериментов принадлежит профессору Ю.А. Скляр (1931–2014). Авторы выражают благодарность В.А. Воробьеву и А.И. Котуме, внесшим большой вклад в разработку аппаратуры и методики анализа данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки России в рамках базовой части (код проекта 2179), гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 16-35-00284 “Исследование пространственно-временного распределения альbedo и поглощенной солнечной радиации на Земле по данным радиометров ИКОР-М” и гранта Русского географического общества № 40/2016-Р “Спутниковый мониторинг радиационного баланса Земли и построение карт распределения его компонентов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Авакян С.В., Воронин Н.А. О возможном физическом механизме воздействия солнечной и геомагнитной активности на явления в нижней атмосфере // Исследования Земли из космоса. № 2. С. 28–33. 2006.

— Богданов М.Б., Червяков М.Ю., Кошель А.А. Десятилетний ряд глобального распределения альbedo по данным ИСЗ “Метеор-М” // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 19. № 2. С. 243–251. 2022.

— Жеребцов Г.А., Коваленко В.А. Влияние солнечной активности на погодно-климатические характеристики тропосферы // Солнечно-земная физика. Вып. 21. С. 98–106. 2012.

— Кондратьев К.Я., Никольский Г.А. Солнечная активность и климат. 1. Данные наблюдений. Конденсационная и озонная гипотезы // Исследования Земли из космоса. № 5. С. 3–17. 1995.

— Крымский Г.Ф. Космические лучи и околоземное пространство // Солнечно-земная физика. Вып. 2(115). С. 42–45. 2002.

— Крымский Г.Ф., Петухов С.И., Павлов Г.С. Моделирование конденсации водяного пара. Четырехточечный потенциал // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 12. С. 1059–1064. 2015.
<https://doi.org/10.15372/AOO20151202>

— Распопов О.М., Веретененко С.В. Солнечная активность и космические лучи: влияние на облачность и процессы в нижней атмосфере (памяти и к 75-летию М.И. Пудовкина) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 2. С. 147–155. 2009.

— Скляр Ю.А., Воробьев В.А., Котума А.И., Червяков М.Ю., Фейгин В.М. Измерения компонентов радиационного баланса Земли с ИСЗ “Метеор-М” № 1. Аппаратура ИКОР-М // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 9. № 2. С. 173–180. 2012а.

— Скляр Ю.А., Воробьев В.А., Котума А.И., Червяков М.Ю., Фейгин В.М. Алгоритм обработки данных наблюдений уходящей коротковолновой радиации с ИСЗ “Метеор – М” № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 9. № 3. С. 83–90. 2012б.

— Almeida J., Schobesberger S., Kürten A. et al. Molecular understanding of sulphuric acid-amine particle nucleation in the atmosphere // Nature. V. 502. Iss. 7471. P. 359–363. 2013.

— Blunden J., Boyer T., (Eds.) State of the Climate in 2021 // Bull. Amer. Meteor. Soc. V. 103(8). S1–S465. 2022.
<https://doi.org/10.1175/2022BAMSStateoftheClimate.1>

— Goode P.R., Palle E., Shoumko A., Shoumko S., Montanes-Rodriguez P., Koonin S.E. Earth’s albedo 1998–2017 as measured from earthshine // Geophys. Res. Lett. V. 48. e2021GL094888. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2021GL094888>

— Gray L.J., Beer J., Geller M. et al. Solar influences on climate // Rev. Geophys. V. 48. RG4001. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2009RG000282>

— Karlsson K.-G., Anttila K., Trentmann J. et al. CLARA-A2.1: CM SAF cLoud, Albedo and surface RAdiation dataset from AVHRR data – Edition 2.1. 2020.
https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/CLARA_AVHRR/V002_01

— Laken B.A., Čalogović J. Composite analysis with Monte Carlo methods: an example with cosmic rays and clouds // Journal of Space Weather and Space Climate. V. 3. A29. 2013.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2013051>

- *Loeb N.G., Thorsen T.J., Norris J.R., Wang H., Su W.* Changes in Earth's energy budget during and after the "pause" in global warming: an observational perspective. 2018.
<https://doi.org/10.3390/cli6030062>
- *Marsh N., Svensmark H.* Cosmic rays, clouds, and climate // *Space Sci. Rev.* V. 94. P. 215–230. 2000.
- *Mironova I.A., Aplin K.L., Arnold F., Bazilevskaya G.A., Harrison R.G., Krivolutsky A.A., Nicoll K.A., Rozanov E.V., Turunen E., Usoskin I.G.* Energetic particle influence on the Earth's atmosphere // *Space Sci. Rev.* V. 194. P. 1–96. 2015.
<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0185-4>
- *Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A., Winn J.P., Hogan E., Killick R.E., Dunn R.J.H., Osborn T.J., Jones P.D., Simpson I.R.* An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 dataset // *J. Geophys. Res.* 2021.
<https://doi.org/10.1029/2019JD032361>
- *Pudovkin M.I., Veretenenko S.V.* Variations of the cosmic rays as one of the possible links between the solar activity and the lower atmosphere // *Adv. Space Res.* V. 17. P. 161–164. 1996.
- *Smith G.L., Priestley K.J., Loeb N.G., Wielicki B.A., Charlack T.P., Minnis P., Doelling D.R., Rutan D.A.* Clouds and Earth Radiant Energy System (CERES), a review: Past, present and future // *Adv. Space Res.* V. 48. P. 254–263. 2011.
- *Stephens G.L., O'Brien D., Webster P.J., Pilewski P., Kato S., Li J.-L.* The albedo of Earth // *Rev. Geophys.* V. 53. P. 141–163. 2015.