

Введение

В настоящее время проблеме формирования и изменений климата уделяется особое внимание [1]. Особую роль в оценке климатических изменений играют космические наблюдения, так как только они могут дать глобальное представление о земной климатической системе и ее изменениях [2]. Для понимания закономерностей климата и его изменений наиболее перспективными оказались спутниковые данные по облачному покрову и радиационному балансу Земли [3].

Возрастающая актуальность данных наблюдений радиационного баланса Земли (и радиационного баланса подстилающей поверхности) определяется, прежде всего, их важным значением для анализа пространственно-временной изменчивости климата; роли радиационных факторов формирования климата и его изменений, а также соответствующих обратных связей (облачно-радиационной) [3]. Повышение температуры океана является главным фактором, способствующим увеличению энергии, содержащейся в климатической системе. Практически определенно температура верхнего слоя океана (0–700 м) повысилась в период с 1971 по 2010 гг., и, вероятно, повышалась с 1870-х годов по 1971 г. [4]. Облака играют жизненно важную роль в регулировании энергетического баланса и климатической системы Земли.

Целью магистерской работы является анализ данных измерений потока отраженной коротковолновой радиации радиометром ИКОР-М на ИСЗ серии «Метеор-М» с целью рассмотрения распределений величин альbedo и поглощённой солнечной радиации на верхней границе атмосферы, оценка пространственно-временной изменчивости этих характеристик, а также выявление взаимосвязи между величиной альbedo и облачностью.

Для реализации, поставленной нами цели, были намечены следующие задачи:

1. С помощью научной литературы рассмотреть информацию о радиационном балансе Земли, облачном покрове на Земле и их спутниковом мониторинге;
2. Рассмотреть распределение величин альbedo и поглощённой солнечной радиации на верхней границе атмосферы над Мировым океаном;
3. Рассмотреть информацию о мониторинге тропических циклонов по спутниковым данным;
4. Оценить распределение альbedo и облачности над тропическими циклонами;
5. Оценить вклад облачности в величину альbedo для океанов, а также изучить взаимосвязь между величинами.

Основное содержание работы

В настоящее время вариации радиационных характеристик Земли успешно изучаются с помощью космических систем, так как радиационный баланс Земли на верхней границе атмосферы играет важную роль в формировании процессов общей циркуляции атмосферы и климата.

Большая часть инструментальных измерений компонентов РБЗ выполнена за рубежом. В России было несколько проектов по измерениям составляющих РБЗ [1].

В 2003 г. научному коллективу под руководством Ю.А. Склярова (главный конструктор) было предложено создать полностью автономный радиометр, получивший название ИКОР-М. Вывод на орбиту ИСЗ «Метеор-М» № 1 состоялся 16 сентября 2009 года. Полноценная информация стала поступать с ноября 2009 года.

Радиометр ИКОР-М предназначен для измерений уходящей коротковолновой радиации на верхней границе атмосферы (ВГА). Это дает возможность получать значения альbedo и поглощенной солнечной радиации, как составляющих радиационного баланса Земли, и осуществлять их мониторинг [5].

Поглощённая солнечная радиация является одной из ключевых переменных Земной климатической системы. Пространственно-временные её вариации определяются, в первую очередь, распределением облачности, характером подстилающей поверхности, планетарным альbedo Земли, временем года и сезонным движением Солнца.

Высокие значения поглощённой солнечной радиации для Мирового океана наблюдаются в экваториальной зоне. С сентября по март значения поглощённой радиации достигают 350-400 Вт/м², в остальные месяцы 300-350 Вт/м².

В Атлантическом океане зона наибольшего поглощения солнечной радиации (400-450 Вт/м²) наблюдается в апреле-июле в пределах 20-40°

северной широты и в ноябре-январе 5-40° южной широты. В южной части Тихого океана максимальные значения поглощенной солнечной радиации также наблюдаются в ноябре-январе на тех же широтах. Однако стоит отметить, что более высокие значения поглощенной солнечной радиации (400-450 Вт/м²) в северной части Атлантического океана наблюдаются крайне редко, а в северной части Тихого океана вовсе отсутствуют. Высокие значения поглощенной солнечной радиации в Индийском отмечаются в южном полушарии в октябре-январе на широте 10-35° [5]. Такое высокое поглощение радиации можно объяснить большой повторяемостью ясного неба (0-3 балла).

Минимальные значения поглощенной радиации в Мировом океане достигают 50 Вт/м². Низкие значения отмечаются в марте-сентябре для южного полушария, в октябре-феврале для северного полушария.

Величины альбедо являются важнейшими характеристиками земной климатической системы, которые дают информацию о снежном и ледовом покрове, облачности и подстилающей поверхности [1].

Анализируя графики распределения альбедо можно выявить территории с максимальными и минимальными значениями величин альбедо. Максимальные значения характерны для приполярных районов. Так для южной части Атлантического океана наибольшее значение альбедо достигается в осенне-зимний период и составляет 45-55 % в 2009-2013 гг. и 55-65 % в последующие годы.

Альбедо тропической зоны Мирового океана в среднем колеблется в пределах 15-25 %, но в некоторых районах максимум достигает 30-35 %, например, в августе – ноябре в Атлантическом океане в широтной зоне 5-20° южной широты. Такие высокие значения альбедо обусловлены развитием мощной конвективной облачности.

В зонах конвективной облачности над акваториями океанов, во внутритропической зоне конвергенции (ВЗК), которая располагается примерно

на широте 5-10° с.ш., значения альbedo также велики. Так, в тропической части Тихого океана севернее экватора альbedo составляет 25-30 %.

Минимальные величины альbedo в Мировом океане располагаются вблизи экватора и имеют значения 10–20 %. Также минимальные величины альbedo 5-10 % наблюдаются в северном полушарии в ноябре-январе на широтах выше 65°, в южном полушарии в марте-августе на широтах ниже 30°.

Особый режим распределения альbedo наблюдается в Индийском океане. Этот океан уникален тем, что большая его часть находится в южном полушарии. Значения альbedo в тропической зоне достигают 30-35 %. Эта область характеризуется постоянством аномально высоких значений альbedo в течение летних месяцев. Это можно объяснить регулярным действием Азиатского летнего муссона, во время которого развивается мощная кучево-дождевая облачность [6].

К настоящему времени накоплен и продолжает регулярно пополняться архив спутниковых снимков и данных альbedo. На спутниковых снимках видимого диапазона были выявлены циклонические вихри, из которых позже развиваются циклоны и ураганы. В программе для ИКОР «IKOR Archive Viewer» были найдены витки спутника в момент прохождения тропических циклонов. По витку были сняты значения альbedo над тропическим циклоном и в зонах вблизи него.

Таким образом, был составлен архив тропических циклонов. Всего было выявлено 44 тропических циклона за период 2018-2019 г. Величины мгновенных значений альbedo для поверхностей тропических циклонов варьируются от 36 до 57 %. Также можно отметить, что в среднем для большей части тропических циклонов (32 %) альbedo составляет 45-49 % (в соответствии с рисунком 1). Такие высокие значения альbedo обусловлены тем, что в тропических циклонах наблюдается плотный облачный покров, состоящий из мощных кучево-дождевых и высоких перистых облаков.

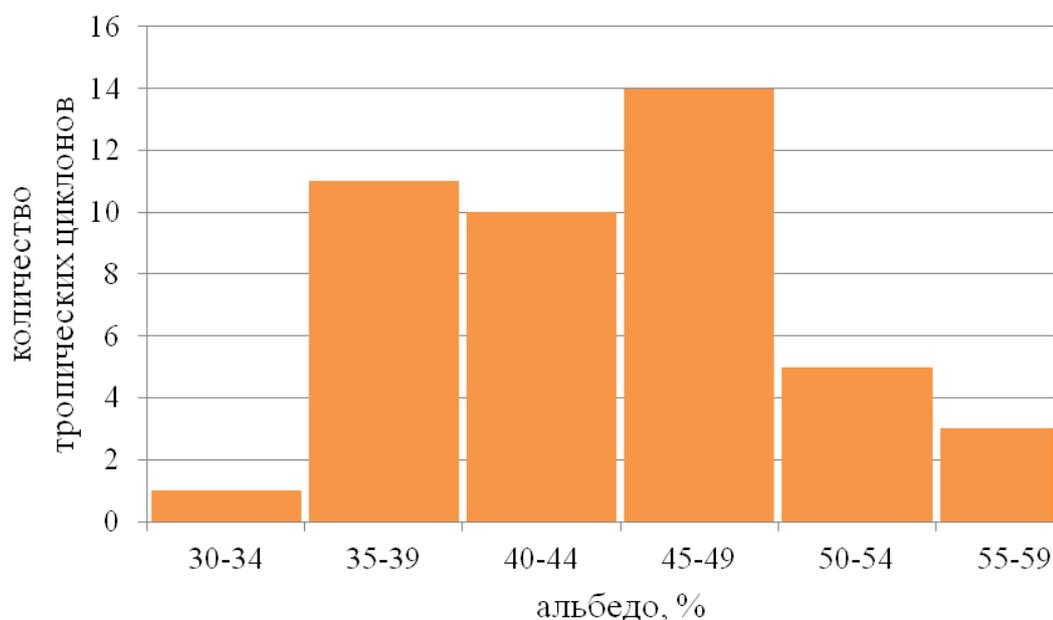


Рисунок 1 – Гистограмма повторяемости значений альбедо для тропических циклонов (составлено автором)

В данной работе рассматривается предположение о взаимосвязи интенсивности тропического циклона и его величины альбедо. В качестве интенсивности тропических циклонов используется классификация циклонов по силе максимального устойчивого ветра. Для выявления категорий тропических циклонов выбрана обобщенная классификация ВМО [7].

Для выявления интенсивности тропических циклонов использовались данные по максимальной устойчивой силе ветра из архива Regional and Mesoscale Meteorology Branch (RAMMB). Стоит уточнить, что категория циклона, скорость ветра и значения альбедо взяты в момент прохождения спутника над тропическим циклоном. Таким образом, можно соотнести категорию циклона и значение альбедо (в соответствии с таблицей 1). В результате можно отметить, что интервальные значения имеют большой разброс. Однако чем выше категория тропического циклона, тем выше среднее значение альбедо.

Таблица 1 – Значения альбедо для категорий тропических циклонов
(составлено автором)

Категория	Скорость ветра, м/с	Интервал	Среднее значение альбедо, %
Ураган 5-ой категории	≥ 63		
Ураган 4-ой категории	52-62	43-52	48
Ураган 3-ой категории	44-51	37-57	46
Ураган 2-ой категории	39-43	39-56	45
Ураган 1-ой категории	30-38	38-52	45
Тропические циклоны доураганной силы			
Тропический шторм	17-29	35-49	43
Тропическая депрессия	0-16	34-52	41

Облачность является одним из наиболее важных факторов изменчивости радиационного режима Земной климатической системы, облака оказывают существенное воздействие на формирование климата [2].

Для выявления взаимосвязи облачности с альбедо были сняты значения данных величин за период с 2015 по 2018 год. По данным были построены карты среднемесячного и среднегодового хода альбедо и облачности над Атлантическим океаном (25-35° з.д.) и двумя частями Тихого океана – западной (140-150° з.д.) и восточной (160-170° в.д.).

Анализируя карты среднегодового распределения альбедо и облачности можно выявить участки с максимальными и минимальными значениями величин. Самые большие значения характерны для районов 45-50° северного и южного полушария. Так для этих областей альбедо достигает 35 %. Такие высокие значения альбедо над этими регионами обусловлены облачным покровом со значением 0,9.

В зонах конвективной облачности над акваториями океанов, во внутритропической зоне конвергенции (ВЗК), которая располагается примерно на широте $5-10^{\circ}$ с.ш., величины альbedo также велики. Так, в восточной зоне Тихого океана наблюдается два максимума альbedo севернее и южнее экватора, и составляют 30 %.

Минимальные величины альbedo в Тихом океане имеют значения 15 – 20 % и располагаются вблизи экватора. Таким низким значениям альbedo соответствуют значения облачности от 0,3 до 0,5. В восточной части Тихого океана зоны с минимальными величинами альbedo располагаются по обе стороны от ВЗК.

Таким образом, широтные распределения облачности позволяют выделить характерные зоны с максимальными значениями облачности: экваториальную ($0-10^{\circ}$ с.ш.), и умеренную северную ($30-50^{\circ}$ с.ш.) и южную ($30-50^{\circ}$ ю.ш.). В течение года в обоих полушариях сохраняется характерный широтный ход с максимумами в умеренных и приэкваториальных областях Земли [2].

В ходе сравнения распределений облачности и альbedo было выявлено наличие корреляции для каждого океана. Например, коэффициент корреляции за 2018 год для Атлантического океана составляет 0,93, для западной части Тихого океана – 0,97, для восточной – 0,91. Также значения альbedo и облачной фракции были разделены территориально - на тропические и внетропические широты. Можно отметить, что во внетропической зоне для Атлантического океана и восточной части Тихого океана взаимосвязь величин выше, чем в тропической зоне. Для западной части Тихого океана коэффициенты корреляции выше в тропической зоне. В целом за наблюдаемые периоды (2015-2018 гг.) значения коэффициента корреляции очень высоки (0,82-0,97). Высокое значение коэффициента корреляции в среднем за год над Мировым океаном обусловлено тем, что океан является практически однородной поверхностью, поэтому на его альbedo может повлиять только наличие над ним облачности [2].

Заключение

На основе исследований, выполненных в магистерской работе, можно сформулировать следующие основные результаты:

В программе для ИКОР «IKOR Fields Editor» были созданы шаблоны для расчета среднезональных составляющих радиационного баланса Земли для Атлантического, Тихого и Индийского океанов. По шаблонам рассчитывались среднемесячные значения поглощённой солнечной радиации для океанов. Минимальные значения поглощённой солнечной радиации отмечаются в марте-сентябре для южного полушария, в октябре-феврале для северного. Максимальные значения поглощённой солнечной радиации наблюдаются в тропической зоне Мирового океана и составляют 400-450 Вт/м².

Получены данные о распределении и вариациях альбедо для Мирового океана, а также каждого океана в отдельности. Максимальные значения альбедо для Мирового океана наблюдаются в осенне-зимний период, достигая в среднем 50-60 %. Такие большие значения обусловлены наличием зоны с максимумом облачности. В районе ВЗК (5-10° с.ш.) альбедо для Тихого и Атлантического океанов достигает 30 % в летне-осенний период. Особый режим альбедо над акваторией Индийского океана, где в летние месяцы развивается летний Азиатский муссон. Так, в зоне 12,5-25° с.ш. летом формируются центры с высокими значениями альбедо, обусловленными развитием здесь мощной кучево-дождевой облачности. Альбедо данной зоны может достигать в эти периоды значений 30-35 %.

Оценены величины мгновенных значений альбедо для поверхностей тропических циклонов. Значения варьируются в пределах 36-57 % и обусловлены тем, что в тропических циклонах наблюдается плотный облачный покров. Была рассмотрена взаимосвязь категории тропического циклона и его значения альбедо. Возможно, величина альбедо является предиктором, приводящим к повышению категории циклона.

Рассмотрена и оценена взаимосвязь величины альбедо и облачности. В результате был выявлен широтный ход облачности и альбедо с максимумами в умеренных и приэкваториальных областях и минимумами на экваторе и по обе стороны от ВЗК.

В ходе анализа данных альбедо и облачности были найдены значительные коэффициенты корреляции для Тихого и Атлантического океанов. Высокие значения коэффициента корреляции (0,82-0,97) объяснены тем, что на альбедо океана может повлиять только наличие над ним облачного покрова.

Основные положения и материалы работы докладывались на следующих конференциях:

1. Всероссийская открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” (Россия, Москва, ИКИ РАН, 2016-2019 гг.);
2. Международный молодежный научный форум «ЛОМОНОСОВ» (Россия, Москва, МГУ, 2017, 2019, 2020 г.);
3. Вторая Всероссийская научная конференция молодых ученых «КИМО-2017» (Россия, Москва, ИО РАН, 2017);
4. Научно-практическая конференция «Presenting Academic Achievements to the World» (Россия, Саратов, СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2017-2018 гг.);
5. Международная научно-техническая конференция «Системы контроля окружающей среды – 2020» (Россия, Севастополь, 2020).