

На правах рукописи

Фомина Надежда Владимировна

**ГЛОБАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ  
РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ ИСЗ РОССИИ И  
США**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Казань – 2009

Работа выполнена в Саратовском государственном университете  
им. Н.Г. Чернышевского на кафедре метеорологии и климатологии

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
Скляр Юри́й Андре́евич
- Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, профессор  
Вельтищев Николай Федорович  
доктор географических наук, профессор  
Френкель Марат Ошеревич
- Ведущая организация:** ГОУ ВПО Пермский государственный  
университет

Защита состоится 17 декабря 2009 г. в 15 часов на заседании  
диссертационного совета Д.212.081.20 Казанского государственного  
университета по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, корп. 2, ауд. 1512

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке им. Н.И. Лобачевского  
Казанского государственного университета.

Автореферат разослан 12 ноября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат географических наук,  
доцент



Ю.Г. Хабутдинов

### **Общая характеристика работы.**

**Актуальность проблемы.** В Саратовском государственном университете ведутся работы как по созданию наземной, аэростатной и спутниковой аппаратуры для измерений составляющих РБЗ так и по обработке результатов наблюдений с аэростатов и ИСЗ. Настоящая диссертация является естественным продолжением двух предшествующих (А.И. Котумы и Н.В. Семеновой), в которых были отработаны основные вопросы обработки спутниковых наблюдений от «сырых» данных на орбите, до построения глобальных карт распределений. Однако остались нерешенными ряд важных вопросов. Кроме того, в связи с ожидаемыми новыми запусками ИСЗ с модернизированной аппаратурой ИКОР-2М, возникла необходимость детального анализа этих вопросов, связанных с обработкой наблюдений как с ИСЗ «Ресурс-01» №4 так и в более широком плане. Было решено также выполнить анализ материалов четырех атласов NASA США, обеспечить сравнимость наших материалов с американскими и подготовить программное обеспечение для обработки предстоящих спутниковых наблюдений.

**Цель настоящей работы** – оценка временной и пространственной изменчивости составляющих РБЗ по материалам наблюдений с ИСЗ «Ресурс-01» №4 (Россия) и ИСЗ «Nimbus-6» и «Nimbus-7» (США).

*Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:*

1. Разработать метод и выполнить расчеты среднесуточных и среднемесячных величин альbedo по данным от ИСЗ «Ресурс-01» №4 с перспективой использования в дальнейших исследованиях.
2. Завершить работы по оценке наблюдаемости земной поверхности с гелиосинхронных ИСЗ при любой ориентации плоскости орбиты по отношению к плоскости меридиана Солнца.
3. Выполнить детальный анализ материалов 4 атласов альbedo, поглощенной радиации и УДР, изданных NASA США, для учета имеющегося опыта и обеспечения сравнимости материалов с подготовленным нами атласом УКР, альbedo и поглощенной радиации с ИСЗ «Ресурс-01» №4.
4. Создать и представить атлас наблюдений радиометром ИКОР с ИСЗ «Ресурс-01» №4. Выполнить предварительный анализ и оценить качество материалов атласа.

### **Использованные материалы.**

1. Данные наблюдений УКР аппаратурой ИКОР с гелиосинхронного ИСЗ «Ресурс-01» №4 за 1998-99 гг.
2. Данные наблюдений УКР аппаратурой ИКОР с ИСЗ «Метеор-3» №7 за 1994-95 гг. и их обработки.
3. Атласы NASA карт распределения альbedo и поглощенной солнечной радиации за 1975-1978 гг. и 1985-1987 гг.
4. Атласы NASA уходящей длинноволновой радиации за 1979-1987 гг.

### **Научная новизна работы.**

1. Разработан метод и алгоритм получения среднесуточных и среднемесячных величин альbedo по измерениям аппаратурой ИКОР с ИСЗ «Ресурс-01» №4.
2. Получены количественные оценки наблюдаемости земной поверхности с гелиосинхронных ИСЗ при любой ориентации плоскости орбиты.
3. Выполнен детальный анализ материалов атласов альbedo, поглощенной радиации и УДР, изданных NASA США.
4. Обработан весь массив наблюдений с ИСЗ «Ресурс-01» №4. Создан макет атласа наблюдений спутниковым радиометром ИКОР с ИСЗ «Ресурс-01» №4 и выполнен предварительный анализ полученных материалов.

### **На защиту выносятся:**

1. Методики и алгоритмы расчета среднесуточных и среднемесячных величин альbedo.
2. Анализ и результаты оценки наблюдаемости земной поверхности с гелиосинхронных ИСЗ для радиометров, ориентированных в надир.
3. Особенности широтного распределения и временных вариаций составляющих радиационного баланса Земли по данным атласов NASA. Методика получения глобальных величин альbedo и поглощенной радиации. Результаты анализа полученного материала.
4. Материалы атласа наблюдений по данным с ИСЗ «Ресурс-01» №4 и оценка его качества.

### **Научно-практическая ценность работы.**

1. Методики расчетов, алгоритмы и соответствующие программные средства могут использоваться для других СПЗ радиометров, работающих на гелиосинхронных орбитах и обычных прямых прецессирующих ИСЗ.

2. Разработана программа расчета среднесуточных величин альbedo. Доработана программа визуализации «ИКОР-М», которая обеспечивает:

- получение широтного распределения УКР, альbedo и поглощенной радиации для любого витка;
- возможность визуального просмотра на картах соответствующих проекций пространственно-временной изменчивости УКР и альbedo для любого витка и любого отсчета с выдачей координат подспутниковой точки, значений местного времени, зенитных углов Солнца и других сопутствующих величин в момент измерений;
- получение глобального распределения среднемесячных величин УКР, альbedo и поглощенной радиации на сетке с ячейками  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  дуги большого круга Земли;
- получение среднемесячных зональных величин УКР, альbedo, поглощенной радиации.

3. На наиболее крупные программы: «Программа расчета среднесуточного альbedo Альбедометр» и «Программа анализа данных спутникового измерителя ИКОР-М» получены свидетельства о государственной регистрации.

4. Создан макет атласа составляющих радиационного баланса Земли по данным ИСЗ «Ресурс-01 №4, который готовится к опубликованию.

### **Апробация работы.**

Основные положения и материалы работы докладывались на следующих конференциях:

1. Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Россия, Москва, ИКИ РАН 2003).
2. Третья всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Россия, Москва, ИКИ РАН 2005).
3. Пятая Юбилейная Открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Россия, Москва, ИКИ РАН 2007).
4. Всероссийская научная конференция с международным участием «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований» (Татарстан, Казань, 2009)

на отчетных научных конференциях географического факультета СГУ и на объединенных семинарах кафедры метеорологии и климатологии СГУ и лаборатории астрономических и геофизических исследований НИИ ЕН отделения механики и физики СГУ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Список использованных источников содержит 84 наименования. В диссертации имеется всего 147 страниц машинописного текста, включая 50 рисунков и 15 таблиц.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 работ. В том числе 2 работы [2, 3] опубликованы в журнале, издаваемом РАН и входящем в список ВАК.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** подчеркнута актуальность проблемы, рассматриваемой в работе, сформулированы ее основные цели и задачи, обоснована научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные результаты, выносимые на защиту.

**Глава 1** содержит описание методики получения среднесуточных величин альbedo радиометром ИКОР. Разработанная методика необходима для определения среднесуточных значений альbedo по мгновенным величинам альbedo, полученным непосредственно из измерений, она также включает в себя, в том числе, и построение карт глобальных распределений среднемесячных величин альbedo, оценку репрезентативности данной методики и сравнимости полученных данных с данными опубликованных атласов.

Альbedo, полученное по величине УКР, дает его мгновенное среднее значение по ПЗ. Если в течение светового дня надирным радиометром будет измеряться альbedo одной и той же сцены, то будут получены различающиеся величины альbedo. Это зависит от ряда причин, в том числе и от условий освещенности сцены. Поскольку на ВГА единственным источником освещенности является Солнце, то альbedo сцены в каждый момент есть функция угла падения лучей Солнца, т.е. его зенитного угла  $Z_{\odot}$ :  $\alpha = \alpha(Z_{\odot})$ . Следовательно, по мгновенному измеренному альbedo конкретного участка поверхности при конкретном  $Z_{\odot}$  необходимо оценить среднесуточное значение альbedo

Конкретно использовались модели, разработанные в проекте США ERBE. Эти модели охватывают 12 различных типов сцен. Каждый тип имеет свою особенную зависимость  $\alpha$  от  $Z_{\odot}$ . При обработке спутниковых измерений надо оценить тип сцены и дальнейшие определения среднесуточных величин альbedo для данного региона, попадающего в ПЗ радиометра, вести с соответствующей моделью.

Для описания изменений потоков радиации в зависимости от зенитного угла Солнца значения этого угла (диапазон изменений  $Z_{\odot}$  от  $0^{\circ}$  до  $90^{\circ}$ ) разделены на промежутки, названные «бинами», и модель представлена в средних оценках для каждого бина. Бины выбирались из условия, что  $\cos Z_{\odot}$  от бина к бину изменяется на 0,1. Альbedo в пределах бина не меняется.

Для представления угловой модели создается нормированная функция альbedo, которая получается путем деления табличного значения альbedo (для любого номера бина) на соответствующее табличное значение альbedo при зенитном положении Солнца (бин 1).

$$n^i = \frac{\alpha^i}{\alpha^{i=1}} \quad (\text{при } i=1,2,\dots,10)$$

Бин  $i=1$  соответствует зенитному значению альbedo для данного типа модели.

Поскольку радиометр на ИСЗ обычно наблюдает данный регион только один раз в течение суток (на освещенной части Земли), то для осреднения в таких условиях можно принять, что характерная для региона сцена в течение дня также не изменится. При таком допущении возможно получить суточное среднее значение альбедо. Это можно выполнить посредством применения соответствующей типу сцены направленной модели.

Из определения нормированной функции альбедо следует, что для измеренного мгновенного значения  $\alpha(Z_{\odot})$  при фактическом зенитном угле  $Z_{\odot}$  в момент измерения можно получить соответствующее зенитное значение альбедо, т.е.  $\alpha(Z_{\odot}=0)$ :

$$\alpha(Z_{\odot}=0) = \frac{\alpha(Z_{\odot})}{n_j^i(Z_{\odot})} \quad (1)$$

где  $n_j^i$ - нормированная направленная функция альбедо,  $i$  – номер бина, а  $j$  – номер модели. Используя это выражение и принцип, заложенный в направленных моделях альбедо, а именно, что существует аналогичное линейное соотношение между среднесуточным значением альбедо  $\bar{\alpha}_{сут}$  и зенитным значением  $\alpha(Z_{\odot}=0)$ , можно получить  $\bar{\alpha}_{сут}$ .

Очевидно, что для получения среднесуточного значения  $\bar{\alpha}_{сут}$  нужно найти коэффициент пропорциональности  $\bar{n}_j^i$ , который рассчитывается как средневзвешенное по инсоляции значение  $n_j^i$  для тех бинов, в которых для измеряемой сцены может в данный день находиться Солнце от восхода до захода. В общем случае этот коэффициент зависит от типа сцены ( $j$ ), от широтного расположения измеряемой площадки ( $\varphi$  - географическая широта), от времени года ( $\delta$  - склонение Солнца). Величины  $\varphi$  и  $\delta$  определяют продолжительность светового дня и минимальное значение  $Z_{\odot}$  в данный день. Коэффициент  $\bar{n}_j^i$  зависит также от времени суток ( $Z_{\odot}$  в момент измерения). Учитывая (1), получим:

$$\bar{\alpha}_{сут} = \bar{n}_j^i \cdot \alpha(Z_{\odot}=0) = \bar{n}_j^i \frac{\alpha(Z_{\odot})}{n_j^i(Z_{\odot})}. \quad (2)$$

Параметр  $\bar{n}_j^i$  позволяет мгновенные значения альбедо в моменты измерений (при фактических значениях  $Z_{\odot}$ ) приводить к соответствующему среднесуточному значению у измеряемой сцены в день измерений.

Предложенная методика расчета среднесуточного альбедо заключается в следующем.

Процедура производится на основании данных, выдаваемых с ИСЗ по каналам телеметрии и содержащих в том числе географические координаты подспутниковой точки на момент измерения, результат измерения в кодах напряжений радиометра. По этим данным определяется мгновенное значение альбедо, зенитный угол Солнца (ЗУС) на момент измерения, т.е. величина  $\alpha(Z_{\odot})$ . ЗУС показывает к какому бину в моделях альбедо относится данное  $\alpha(Z_{\odot})$ , для этого достаточно установить, в границах какого бина находится  $Z_{\odot}$  в момент измерения. По географическим координатам подспутниковой точки, к которой привязывается  $\alpha(Z_{\odot})$ , определяется номер ячейки принятой сетки. Следовательно, сразу определяется базовая модель альбедо. Базовых моделей в таблице моделей направленного альбедо всего пять: океан, суша, снег, пустыня, смесь. Остальные созданы на основе базовых при соответствующих градациях облачности. Принадлежность мгновенного измеренного значения альбедо  $\alpha(Z_{\odot})$  к

соответствующему табличному типу определяется следующим образом. По полученному бину ЗУС, отыскивается табличная величина альbedo  $\alpha_j^i$ , наиболее близкая к измеренному значению  $\alpha(Z_\odot)$  среди типов моделей для данной подстилающей поверхности. Базовая модель отыскивается по типу подстилающей поверхности, а конкретная – с учетом облачности. Следовательно, к  $\alpha(Z_\odot)$  можно применять определенное моделями направленного альbedo значение нормированной направленной функции  $n_j^i$ , рассчитанной для ЗУС в пределах конкретного бина. Тогда для измеренной величины альbedo  $\alpha(Z_\odot)$  сразу находится конкретное значение «зенитного» альbedo, т.е. альbedo при  $Z_\odot=0$ :

$$\alpha(Z_\odot = 0) = \frac{\alpha(Z_\odot)}{n_j^i} \quad (3)$$

Таким образом, определение конкретного значения зенитного альbedo по  $\alpha(Z_\odot)$  в случае, когда углы  $Z_\odot$  заключены в пределах одного бина, производится с одним и тем же значением  $n_j^i$ .

Реально над данной ячейкой сетки на ВГА Солнце в течение светового дня проходит бины от 10-го (после восхода) до некоторого минимального (полдень) и затем в обратном порядке до захода. Поскольку суточные параллели Солнца симметричны относительно небесного меридиана, можно рассматривать, например, только первую половину дня.

Выражение (3) можно использовать для получения среднесуточного значения альbedo  $\bar{\alpha}$ . Из этого выражения следует:  $\alpha(Z_\odot) = \alpha(Z_\odot = 0)n_j^i$ . Если учесть, что Солнце за день проходит количество бинов, до некоторого бина  $k$ , и получить усредненное за световой день значение  $\bar{n}_j^i$  для выбранной модели, то тогда  $\bar{\alpha} = \alpha(Z_\odot = 0)\bar{n}_j^i$  в соответствии с принципами построения направленных моделей альbedo. Очевидно, что вклад каждого  $n_j^i$  в среднесуточное значение альbedo пропорционален промежутку времени  $\Delta t_b^i$  пребывания Солнца в соответствующем бине.

А сумма  $\Delta t_b^i$  для бинов от восхода Солнца до меридиана равна часовому углу восхода  $t_s$  выраженному во времени. Тогда среднесуточное (т.е. за световой день, т.к. ночью альbedo не измеряется) значение нормированной величины  $n_j^i$ , очевидно, равно:

$$\bar{n}_j^i = \frac{\sum_{i=10}^k \Delta t_b^i n_j^i}{t_s},$$

где  $i=10, 9 \dots k$ , при этом  $k$  – наименьший номер бина, соответствующего  $Z_\odot^{6.k.}$  для выбранной ячейки сетки. В наших обозначениях номер бина совпадает с номером часового угла Солнца при пересечении им нижней границы бина. В зависимости от широты места ячейки сетки и времени года Солнце может проходить разное число бинов. Для того, чтобы определить наименьший номер бина, находится минимальное зенитное расстояние Солнца,  $Z_\odot^{6.k.}$  для любой точки на ВГА по значениям ее широты и склонения Солнца в момент его верхней кульминации.

Часовые углы Солнца в моменты восхода и захода  $t_s$  определяются по формуле:

$$\cos \alpha_s \approx -t \sin \delta \quad (4)$$

и выражаются в единицах времени. Для определения часовых углов моментов входа Солнца в бин применяется соотношение:

$$c \cdot t_b^i = \frac{c}{s} \frac{Z_b^i - s \cdot \phi \sin \delta}{c \cdot \phi c \cdot \sin \delta} \quad (5)$$

Здесь  $Z_b^i$  – значения ЗУС для нижних границ бинов,  $t_b^i$  – часовые углы Солнца при пересечении им нижних границ бина.

Применяя (5) к нижним границам бинов получим:  $\Delta t_b^i = t_i - t_{i-1}$ .

Среднее значение альбедо за сутки может отличаться от мгновенного. Специфика измерений радиометром типа ИКОР в том, что он измеряет УКР и альбедо только в одном направлении – в надир. Если орбита гелиосинхронного ИСЗ околополуденная, то мгновенные альбедо у низких географических широт всегда будут измеряться при относительно малых  $Z_{\odot}$ . А при получении среднего значения  $n_j^i$  учитываются все бины до горизонта (включая бин 10). Но у бинов с большими значениями  $Z_{\odot}^i$  нормализованные функции  $n_j^i$  имеют высокие значения (кроме сцены «снег»), за счет чего среднесуточные величины альбедо для этого типа орбиты будут больше мгновенных в низких широтах. В высоких широтах, когда Солнце может в течение дня двигаться в пределах 1-2 бинов у горизонта, среднесуточное альбедо будет близко к мгновенному.

Однако, в высоких и особенно приполярных широтах в различные времена года из-за влияния годовых изменений склонения Солнца в пределах от  $-23^{\circ}27'$  до  $+23^{\circ}27'$ , восходы и заходы могут отсутствовать. Далее в главе рассматриваются в общем виде особенности суточного движения Солнца на приполярной широте.

Показано, что условием для незаходящего Солнца будет следующее:  $\delta \geq 90^{\circ} - \phi$ , а для заходящего и восходящего:  $\delta < 90^{\circ} - \phi$ . Так как предельное положительное склонение Солнца в день солнцестояния в нашу эпоху равно  $+23^{\circ}27'$ , то можно легко найти широту, начиная с которой появляются полярные дни. Очевидно, что это будет условие  $90^{\circ} - \phi_{\text{п}} = 23^{\circ}27'$  откуда  $\phi_{\text{п}} = 90^{\circ} - 23^{\circ}27' = 66^{\circ}33'$ . Это и есть широта северного полярного круга  $\phi_{\text{п}}$ . Именно на этой широте теоретически один раз в году 22 июня Солнце не заходит, а лишь коснется горизонта в точке севера N. Таким образом, широта полярного круга является пределом, до которого в течение всего года применима разработанная методика, т.к. до этой широты всегда существуют восходы-заходы Солнца, и действует формула (4).

Поскольку в южном полушарии ситуация симметрична и обратна по отношению к временам года, то и южный полярный круг играет точно такую же роль для южных широт.

Таким образом, в зоне широт от южного до северного полярных кругов для любой широты и любого склонения Солнца (любого времени года) в каждый день года имеются восход и заход Солнца. Формула (4) действует, следовательно, действует и методика расчетов среднесуточного альбедо.

В приполярных широтах количество явлений восход-заход сокращается на столько дней, на сколько появляется дней без заходов Солнца (полярный день). Это следует из выполнения условия  $\delta > 90^{\circ} - \phi$ . В диссертации приведена упрощенная методика расчетов продолжительности полярного дня для любых полярных широт.

При приближении к полюсу убывает величина  $90^{\circ} - \phi$  и растет число дней полярного дня. Если  $\phi = 90^{\circ}$ , т.е. площадка находится на полюсе,  $90^{\circ} - \phi = 0$ , т.е. полюс мира P совпадает с зенитом, а небесный экватор совпадает с математическим горизонтом. При любых  $\delta > 0$  Солнце не будет заходить, а при  $\delta < 0$  будет кружить под горизонтом. Это тот случай, когда 21 марта Солнце пересечет экватор, поднимаясь в

северное полушарие. Это и будет день восхода. Через полгода Солнце уйдет в южное полушарие. Один восход, один заход, полгода полярный день. После 21 марта Солнце медленно поднимаясь почти по окружностям последовательно проходит 10-й, 9-й... и пересекает нижнюю границу 6-го бина (ее зенитное расстояние  $66^{\circ}42'$  а ЗУС 22 июня  $66^{\circ}33'$ ). После этого бины проходятся Солнцем в обратном порядке. Нет надобности искать среднесуточное альbedo. Просто нужно определить по  $\delta_{\odot}$  в каком бине происходит суточное движение Солнца в данный день. Измеренное значение альbedo равно среднесуточному. А во всех других случаях, когда  $\varphi > \varphi_p$ , но меньше  $90^{\circ}$ , усреднение по разработанной методике производится только для дней, когда  $\delta < 90^{\circ} - \varphi$ , т.е. когда еще имеются восходы-заходы Солнца.

В случае незаходящего Солнца, при  $\delta > 90^{\circ} - \varphi$ , усреднение можно выполнить следующим образом. Рассмотрим рисунок 1. На нем изображена ситуация, когда  $\delta > 90^{\circ} - \varphi$ , восхода-захода нет, Солнце в нижней кульминации проходит над точкой севера (N).

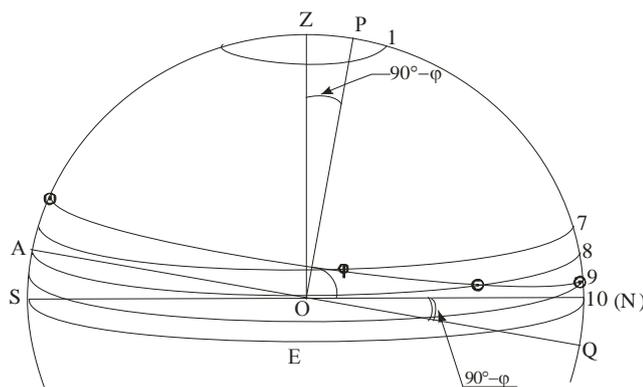


Рис. 1. К расчету среднесуточных альbedo в условиях «полярного дня»

Для оценки ЗУС воспользуемся формулой зенитного угла Солнца в нижней кульминации:

$$Z_{\odot}^{н.к.} = 90^{\circ} - \varphi - \delta \quad (6)$$

Эта формула легко находится из рисунка 1:  $Z_{\odot}^{н.к.}$  - это  $\angle ZO\odot$  (над точкой севера N). Он состоит из 2-х углов:  $\angle ZOP = 90^{\circ} - \varphi$  и  $\angle PO\odot = 90^{\circ} - \delta$ . Их сумма дает формулу (6). Находя по формуле (6)  $Z_{\odot}^{н.к.}$  и сопоставляя его с табличными величинами нижних границ бинов, получим место Солнца в соответствующем бине в момент нижней кульминации. Изображен случай, когда Солнце кульминирует над нижней границей 9-го бина. Далее, вместо определения часового угла восхода Солнца сразу принимаем часовой угол в нижней кульминации 12 часов. Затем, подставляя в формулу (5) нижнюю границу 8-го бина, получим  $t_b^8$  и время пребывания Солнца в бине 9: (12 час -  $t_b^8$ ) и далее, как и в предложенной методике. Таким образом, в данном примере бин 10-й исключается из осреднения. Аналогично и для других приполярных широт.

Для получения среднесуточного значения поглощенной радиации на какой-либо площадке необходимо знать среднесуточную величину приходящего солнечного излучения  $\bar{E}$  [Вт/м<sup>2</sup>] и среднесуточную величину альbedo этой же площадки  $\bar{\alpha}$ . Тогда суточное среднее поглощенной радиации Q можно выразить как:

$$Q = \bar{E}(1 - \bar{\alpha}) \quad (7)$$

Величину  $\bar{E}$  можно получить, пользуясь известной формулой Миланковича для расчета дневной суммы солнечной радиации  $E_{\Sigma}$  на верхней границе атмосферы (ВГА):

$$E_{\Sigma} = \frac{E_0 T_0}{r^2 \pi} (t_s \sin \varphi \sin \delta + c \cos \varphi \cos \delta \sin t_s), \quad (8)$$

где  $E_0$  – величина солнечной постоянной,  $T_0$  – продолжительность суток ( $T_0=86400$  с);  $t_s$  – выраженный в радианах часовой угол Солнца в моменты восхода  $t_{\text{в}}$ , либо захода  $t_{\text{з}}$ ,  $r$  – текущее расстояние Земля-Солнце в астрономических единицах,  $\varphi$  – широта места,  $\delta$  – склонение Солнца. Для ВГА (нет рефракции) величина  $t_s$  находится по формуле (4), откуда  $+t_s = t_{\text{з}}$ ;  $-t_s = t_{\text{в}}$ .

Выражение (8) дает полную энергию  $E_{\Sigma}$  [Дж/м<sup>2</sup>] на квадратный метр за световой день. Очевидно, что эта же энергия получается площадкой и за сутки. Тогда для получения  $\bar{E}$  необходимо выражение (8) разделить на  $T_0$  и расчетная формула для  $\bar{E}$  принимает вид:

$$\bar{E} = \frac{E_0}{r^2 \pi} (t_s \sin \varphi \sin \delta + c \cos \varphi \cos \delta \sin t_s) \quad (9)$$

Следует отметить, что поскольку в течение суток расстояние  $r$  меняется незначительно, то можно при расчетах  $E=E_0/r^2$  пользоваться единым значением для текущих суток.

В приполярных широтах формула приобретает вид ( $t_s=\pi=12$  ч.):

$$\bar{E} = \frac{E_0}{r^2} (\sin \varphi \sin \delta)$$

На полюсе ( $\varphi=90^\circ$ ): 
$$\bar{E} = \frac{E_0}{r^2} c \cos \delta$$

Формула напоминает общую формулу падения радиации на поверхность; она уменьшается пропорционально косинусу угла падения лучей с нормалью к поверхности. Все вышеизложенные соображения учтены при доработке программ расчетов.

**Глава 2** Описывается методика оценки наблюдаемости земной поверхности с гелиосинхронных орбит радиометрами, ориентированными в надир. Ранее, в работах Ю.А. Склярова с сотрудниками была решена конкретная задача оценки наблюдаемости земной поверхности с ИСЗ «Ресурс-01» №4. В настоящей работе метод обобщен. Созданная на основе полученных соотношений программа позволяет оценить годовой ход наблюдаемости земной поверхности для орбит любой ориентации.

Практически у всех гелиосинхронных орбит угол наклона  $i$  задается в пределах 98-99 градусов. Следовательно, величиной, которая может изменяться в пределах  $0^\circ \dots +90^\circ$  и  $0^\circ \dots -90^\circ$  для каждого из узлов орбиты, является угол ориентации  $\omega$ , т.е. угол в плоскости экватора между заданным узлом и меридианом Солнца. Если  $\omega=0^\circ$ , то спутник является полуденным (он пересекает экватор в 12 часов местного солнечного времени). При  $\omega > 0^\circ$ , при величинах  $20^\circ-45^\circ$  говорят о дополуденном ИСЗ (время пересечения экватора 10,5–9 часов). При  $\omega$  близком к  $90^\circ$  спутник является утренним. Наоборот, при  $\omega < 0^\circ$  спутники являются послеполуденными и вечерними для выбранного узла. При одном и том же значении  $\omega$ , но с различными узлами (восходящим, либо нисходящим на освещенной стороне Земли), картина наблюдаемости изменяется для северного и южного полушарий. Рассмотрен ряд примеров анализа.

**Спутник с восходящим узлом на освещенной стороне Земли** (см. рис. 2). Солнце находится в ЮП, склонение его  $\delta$  отрицательно, а в СП зима. Линия

терминатора ТЕТ' теперь ограничивает освещенную часть поверхности Земли справа со стороны Солнца. Северный полюс Р находится в зоне полярной ночи. Восходящий узел К на солнечной стороне. Спутник движется из ЮП в СП и линия терминатора в СП для него является линией захода за нее. Условия наблюдаемости изменились, т.к. изменился порядок прохождения точек  $\pi_1$  ( $\pi_1$  - момент времени, когда терминатор открывает точку перегиба М, выводя ее на освещенное полушарие) и  $\pi_2$  ( $\pi_2$  – аналогично, момент закрытия точки М терминатором) по отношению к точкам равноденствий  $\Upsilon$  и  $\Omega$ . По мере движения Солнца из ЮП в СП (Солнце приближается к экватору), линия терминатора сначала проходит точку Q при  $\delta=0$ , это день весеннего равноденствия. И лишь через интервал времени  $\Delta t$ , пройдет точку перегиба М (момент  $\pi_1$ ), выводя ее на освещенную часть параллели  $+81^\circ$ .

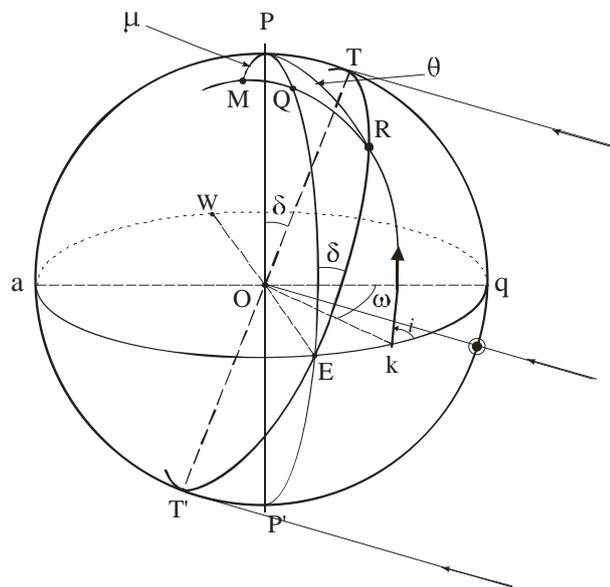


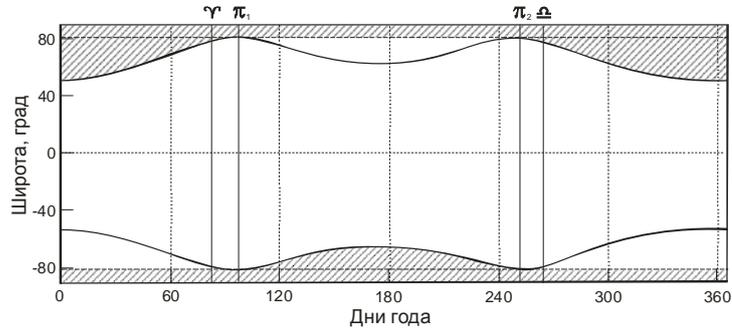
Рис. 2. Схема системы «орбита гелиосинхронного ИСЗ – терминатор». Узел восходящий на солнечной стороне. Спутник дополуденный. К расчету широт захода подспутниковой точки за терминатор.

В СП с этого момента начинается период двукратных измерений до и после прохождения спутником точки М для любой параллели с  $\varphi < +81^\circ$  вплоть до минимального значения  $\varphi_{min}$  22 июня. Затем, при обратном ходе Солнца к экватору из СП в ЮП линия терминатора сначала пересечет точку перегиба М (момент  $\pi_2$ ) и лишь через отрезок времени  $\Delta t$  пройдет точку Q (день осеннего равноденствия). Ситуация изображена на рисунке 3 (А). Из него следует, что в СП период, благоприятный для наблюдений высоких широт (от точки  $\pi_1$  до  $\pi_2$ ), теперь меньше, чем для случая нисходящего узла на освещенной стороне. Для рассматриваемого случая промежуток  $\pi_1\pi_2$  составляет 164 дня ( $186 - 2\Delta t$ ),  $\pi_2\pi_1$  201 день ( $179 + 2\Delta t$ ). Аналогично изменится наблюдаемость в ЮП, где эти цифры поменяются местами. Из-за эллиптичности земной орбиты и неравномерного движения Земли по ней, промежутки времени от дня весеннего равноденствия до дня осеннего  $\Upsilon \rightarrow \Omega$  и наоборот – не равны. В настоящую эпоху они составляют:  $\Upsilon \rightarrow \Omega$  равен 186 дней (Земля проходит афелий орбиты около 3 июля, т.е. в весенне-летний период движется медленнее); промежуток времени  $\Omega \rightarrow \Upsilon$  равен 179 дней (перигелий Земля проходит около 4 января).

Таким образом, гелиосинхронная орбита с восходящим узлом на солнечной стороне для дополуденного ИСЗ лучше приспособлена для наблюдения высоких широт в ЮП.

**ИСЗ полуденный,  $\omega = 0$ .** Из рисунка 2 следует, что  $\angle MPQ=0$ , точка перегиба М совпадает с точкой Q на большом круге PQEP', перпендикулярном меридиану Солнца. Поскольку только что рассмотрена ситуация для наблюдаемости с восходящим узлом на освещенной стороне, обратимся к рисунку 2. При  $\omega=0^\circ$  восходящий спутник пересекает экватор при местном солнечном времени 12 часов (поэтому ИСЗ полуденный). Линия терминатора в СП является линией захода спутника за него, перехода ИСЗ на неосвещенную половину Земли.

А)



Б)

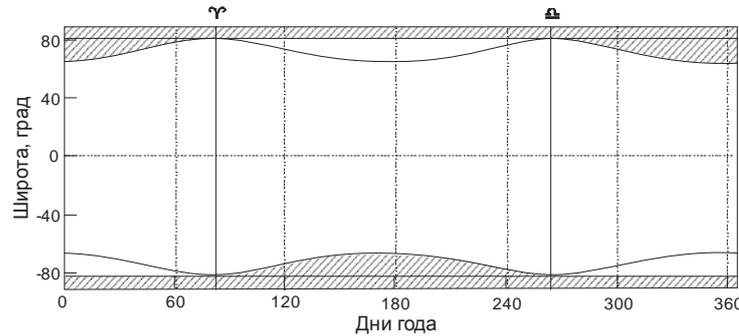


Рис. 3. Границы наблюдаемых и не наблюдаемых частей поверхности Земли

А) для случая, приведенного на рис. 2.

Б) для случая, для полуденных гелиосинхронных ИСЗ ( $\omega = 0, \mu = \pm 9^\circ$ ).

Из рисунка 2 видно, что ИСЗ в точке перегиба орбиты М выйдет на освещенную часть в день весеннего равноденствия (при  $\delta=0^\circ$ ), когда линия терминатора совпадет с линией PQEP'. Ясно также, что точка М будет оставаться на освещенной части параллели  $+81^\circ$  в течение всего весенне-летнего периода и вновь попадет в теневую часть параллели при  $\delta=0^\circ$  в день осеннего равноденствия и т.д.

Результаты расчетов для этого случая ( $i=99^\circ, \omega=0^\circ$ ) приведены на рисунке 3 (Б). Видно, что кривые захода за терминатор в СП и выхода из-за терминатора в ЮП симметричны относительно точек  $\gamma$  и  $\pi_2$  ( $\pi_1$  совпадает с  $\gamma$ , а  $\pi_2$  – с  $\pi_1$ ). Вновь напомним, что продолжительность периодов  $\gamma \rightarrow \pi_2$  и  $\pi_2 \rightarrow \gamma$  разная за счет эллиптичности орбиты Земли. В данном случае они различаются на 7 дней (186 суток первый и 179 второй).

Не трудно понять, что в случае нисходящего полуденного спутника в точке  $q$  (рисунок 2) находится нисходящий узел, общая картина не изменится. Точка перегиба М при этом располагается за плоскостью солнечного меридиана РТqР' на противоположной части круга РЕР'. Годовая кривая пересечения подспутниковой точкой терминатора будет кривой выхода из-за него в СП и захода за терминатор в ЮП. Остальные обстоятельства наблюдаемости поверхности одинаковы для восходящего и

нисходящего полуденных ИСЗ. Отметим, что наиболее близким реализованным полуденным ИСЗ являлся спутник проекта ERB «Nimbus-7» с восходящим узлом.

**ИСЗ послеполуденный,  $\omega < 0$ .** Для случая восходящего спутника вновь воспользуемся рисунком 2. Из него следует, что при  $\omega < 0$  восходящий узел будет восточнее Солнца (на экваторе за плоскостью рисунка). При прохождении спутником узла местное время в этот момент будет больше 12 часов (обычно для послеполуденных ИСЗ 14 час.30 мин. – 15 часов). В этом случае точка перегиба М окажется правее точки Q (для условий рисунка 2). Тогда, при движении Солнца к северу, терминатор сначала пересечет точку М, выводя ее на освещенную часть земного шара. И только через некоторый интервал времени  $\Delta t$  терминатор совпадает с кругом PQEP', при этом  $\delta=0$ , день весеннего равноденствия. Возвращаясь, при уходе Солнца из СП, терминатор вначале пройдет точку Q (день осеннего равноденствия), и лишь через тот же интервал времени  $\Delta t$  пройдет точку перегиба М, переводя ее на затененную часть параллели  $+81^\circ$  в СП. Ситуация в точности совпадает с той, которая рассмотрена для дополуденного (с нисходящим узлом) ИСЗ «Ресурс-01» №4. Разница в том, что теперь кривая годового хода точек пересечения терминатора в СП является кривой захода подспутниковой точки за него. Таким образом, при равных  $i$  и  $\omega$ , но смене положения узлов на  $180^\circ$  и знака  $\omega$  на  $-\omega$  условия наблюдаемости земной поверхности одинаковы (мы уже не анализируем ситуацию в ЮП, она аналогична).

**ИСЗ утренний или вечерний,  $\omega = \pm 90^\circ$ .** В такой постановке представляется, что имеется 4 варианта: утренний ( $\omega = +90^\circ$ ) восходящий и нисходящий; вечерний ( $\omega = -90^\circ$ ), также два спутника. Однако в силу особенностей данных конфигураций фактически условия наблюдаемости определяются двумя вариантами.

Из рисунка 2 можно видеть, что при совпадении восходящего узла К с точкой Е экватора (перпендикулярна точке **q** солнечного меридиана), линия узлов совпадает с линией EW. Вокруг этой линии, при движении Солнца по широте (от  $-23,5^\circ$  до  $+23,5^\circ$ ) в течение года, поворачивается плоскость терминатора. Теперь терминатор пересекается спутником только в узлах орбиты (т.е. в точках Е и W) при переходе из одного полушария в другое. Нет годовой линии хода широт пересечения подспутниковой точкой терминатора. В течение года плоскость терминатора дважды совпадает с плоскостью орбиты ИСЗ: при движении Солнца к северу (до 22 июня) и при его обратном движении из СП в ЮП (до 23 декабря). В такие дни подспутниковая точка весь виток совершает над терминатором. Затем, в зависимости от направления движения Солнца, либо северная половина орбиты оказывается целиком на Солнце, а южная – целиком в тени, либо наоборот. Таким образом, одновременно происходит резкая смена условий наблюдения земной поверхности. Оценить наступление дней таких переходов несложно.

Рассмотрим случай орбиты с восходящим узлом К при  $\omega = +90^\circ$ , спутник утренний. Из рисунка 4 следует, что в СП точка перегиба орбиты М теперь расположена в плоскости, проходящей через Солнце на меридиане РMaP', противоположном Солнцу, за полюсом Р. Очевидно из предыдущего, что дуга PM= $\mu=9^\circ$  (рассматриваем орбиту с наклоном  $99^\circ$ ). TET' - линия терминатора,  $\odot$  - подсолнечная точка на поверхности Земли. Склонение Солнца  $\delta$  отрицательное, Солнце – в ЮП. М' - точка орбиты, противоположная М. М'KM – восходящая половина орбиты спутника. Для выбранного момента (до дня весеннего равноденствия) из рисунка 4 видно, что южная часть орбиты (дуга М'К, все равно что М'Е) полностью находится на солнечной стороне, а северная KM – на теневой. Наблюдениями охвачены широты  $0^\circ \dots -81^\circ$ , причем на всем этом интервале широт делается по два наблюдения (на

восходящей и нисходящей ветвях орбиты) для каждой широты. Северное полушарие полностью не наблюдаемо.

При движении Солнца к северу в момент  $\delta=0^\circ$ , день весеннего равноденствия, терминатор совпадает с кругом  $PEP'$ , перпендикулярным меридиану Солнца. Далее, через интервал времени  $\Delta t'$  терминатор совпадает с треком орбиты  $MKM'$ . Поскольку дуга  $PM=9^\circ$ , то это произойдет также при  $\delta_0=9^\circ$ , что соответствует дате 14 апреля, т.е. на 24 дня позже прохождения точки весны. Это предельное значение даты запаздывания (ранее  $\Delta t$ ). Далее вся северная половина орбиты оказывается на Солнце, а южная так же одновременно погружается в тень. При обратном (после 22 июня) движении терминатора, за 24 дня до дня осеннего равноденствия, происходит обратная смена картины. Таким образом, СП может наблюдаться с 14 апреля до 30 августа, а ЮП для этого типа орбиты с 30 августа до 14 апреля следующего года. Соответствующий график с результатами вычислений показан на рисунке 5 (А). Кажется, что покрытия наблюдениями в течение всего светлого периода от  $0^\circ$  до  $\pm 81^\circ$  благоприятно для сбора данных. Однако, одно обстоятельство сводит на нет это преимущество. Дело в том, что спутник даже в самом лучшем случае не отходит далеко от терминатора. На терминаторе же Солнце везде находится на местном горизонте.

На части поверхности Земли, расположенные вдоль терминатора, практически не поступает солнечная радиация. Соответственно мизерны отраженные потоки, что приводит к огромным погрешностям при измерениях УКР, а значит альbedo и поглощенной солнечной радиации.

Из рисунка 4 видно, что наиболее значимая в энергетическом плане тропическая зона проходится спутником при высотах Солнца от  $0^\circ$  на экваторе (точка Е) до нескольких градусов. Результаты расчетов для ИСЗ с  $\omega = +90^\circ$  и нисходящим узлом представлены на рисунке 5 (Б). Видно, что теперь большая часть времени наблюдений приходится на СП. Отметим еще, что при  $\omega = \pm 90^\circ$  фактически остается 2 варианта.

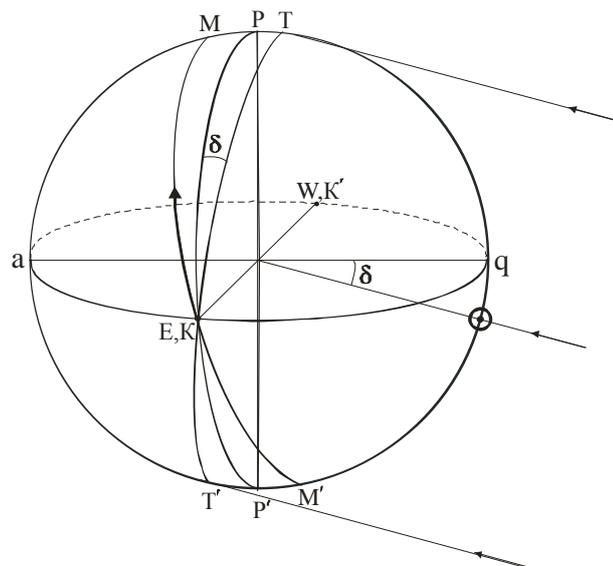
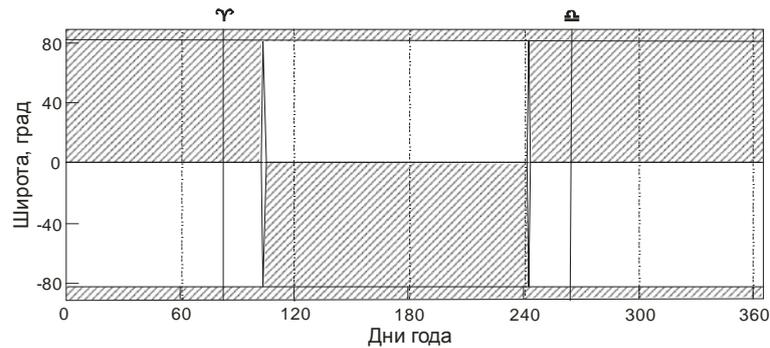


Рис. 4. Схема расположения основных элементов для ИСЗ утреннего ( $\omega = 90^\circ$ ) с восходящим узлом

В самом деле условия наблюдений с утреннего ИСЗ ( $\omega = 90^\circ$ ) с восходящим узлом тождественны с условиями для вечернего ИСЗ ( $\omega = -90^\circ$ ) с нисходящим узлом, т.к. можно брать такую же орбиту на ее нисходящей половине. Не рассматривая всех вариантов, отметим, что в силу указанного выше недостатка подобные орбиты на

практике не реализуются, скорее представляют теоретический интерес. Утренними и вечерними ИСЗ принято на практике называть спутники с временами пересечения экватора, близкими к 7 час.30 мин. и 19 час. 30 мин соответственно.

А)



Б)

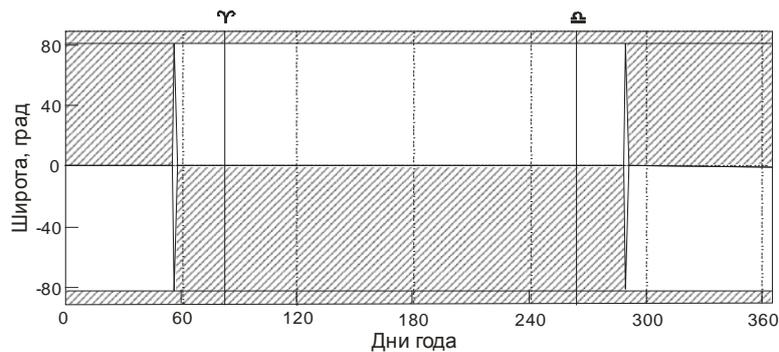


Рис. 5. Границы наблюдаемых и не наблюдаемых частей поверхности Земли

А) для случая, приведенного на рисунке 4

Б) для ИСЗ утреннего  $\omega = 90^\circ$  с нисходящим узлом

В диссертации обсуждены некоторые другие детали, имеющие отношение к технике вычислений. Была создана программа расчетов, результаты приведены выше. Изложенный выше метод дает возможность рассчитать условия наблюдаемости земной поверхности для подспутниковой точки (центра ПЗ) радиометра при любой ориентации орбиты.

Остается проблема учета переходных процессов у линии терминатора. Поле зрения СПЗ радиометров обычно имеет угловой радиус около  $5^\circ$  дуги большого круга на поверхности Земли. Поэтому «чистые» измерения будут наблюдаться, начиная с такого углового расстояния от терминатора (ближе – в ПЗ появляется ночная часть поверхности Земли). Для СПЗ радиометров это все же действительно не очень большая проблема. Иное дело – ШПЗ радиометры, работавшие и работающие на американских ИСЗ. Радиус их ПЗ  $\sim 30^\circ$  дуги большого круга. То есть, уже на таком угловом расстоянии захватывается терминатор и часть поверхности за ним.

Понятно, что в таком случае «чистые» измерения фактически ограничены сравнительно небольшой зоной земной поверхности (приблизительно минус  $30^\circ$  от северной и столько же от южной частей терминатора).

**Глава 3** посвящена анализу материалов атласов NASA, изданных по результатам наблюдений с американских спутников «Nimbus-6» и «Nimbus-7». На этих ИСЗ работали широко и среднеугольные радиометры. Орбиты гелиосинхронные с параметрами, близкими к параметрам орбиты российского ИСЗ «Ресурс-01» №4, так что можно сравнивать результаты наблюдений с нашим радиометром ИКОР. Всего в нашем распоряжении оказалось 4 атласа, два атласа альбедо и поглощенной солнечной

радиации представляют в основном карты глобальных распределений обоих параметров и сводные таблицы среднемесячных альbedo для широтных зон с шагом 5° по широте. Два атласа уходящей длинноволновой радиации (УДР) представляют карты глобальных распределений УДР на каждый месяц. Эти данные сопровождаются таблицами сферических гармонических коэффициентов разложения на каждый месяц. Одной из задач данного исследования явилась возможность проверки на материалах измерений условия равенства нулю РБЗ на верхней границе атмосферы (ВГА).

По таблицам среднемесячных зональных величин альbedo строились графики широтного распределения среднемесячных величин альbedo за соответствующий месяц. На рисунке 7 в качестве примера приведены график за 1986 г. За все остальные годы распределения похожи на приведенные и отличаются в незначительных деталях.

С увеличением широты в обоих полушариях альbedo растут, причем рост альbedo отражает сезонные особенности и соответствует увеличению зенитного угла Солнца. В тропических широтах (грубо от -25° до +25°) в любой сезон величины альbedo минимальны, имеют небольшой разброс и группируются около 0,20 для ИСЗ Nimbus-6 и около 0,25 для ИСЗ Nimbus-7. Это указывает на незначительные изменения количества облачности в среднемесячных значениях в экваториальной зоне. На всех графиках отчетливо прослеживается небольшой максимум альbedo в зоне +5°...+20° в июне и сентябре, минимум в марте и частично в декабре. Аналогично наблюдается вторичный максимум в зоне -5°...-15° в декабре-марте месяцах.

Такие изменения обычно связывают с облачностью внутритропической зоны конвергенции (ВЗК). Во все годы и сезоны величины альbedo над Антарктидой (-75°...-90°) выше, чем соответствующие величины в северных полярных широтах. В северном полушарии (СП) величины альbedo в зимне-весенний период (декабрь-март) и летне-осенний (июнь-сентябрь) различаются значительно больше, чем соответствующие по сезону величины в южном полушарии.

Очевидно, что это следствие различия в характере поверхности (материки и океаны). Наступление и сход снежного покрова в СП вносят большой вклад в эту разницу. Абсолютно наибольшие величины зонального альbedo отмечены на широтах 80° и 85° южного полушария (ЮП), где они составляют 0,87 и 0,89, что существенно выше величин альbedo, принятых в моделях США.

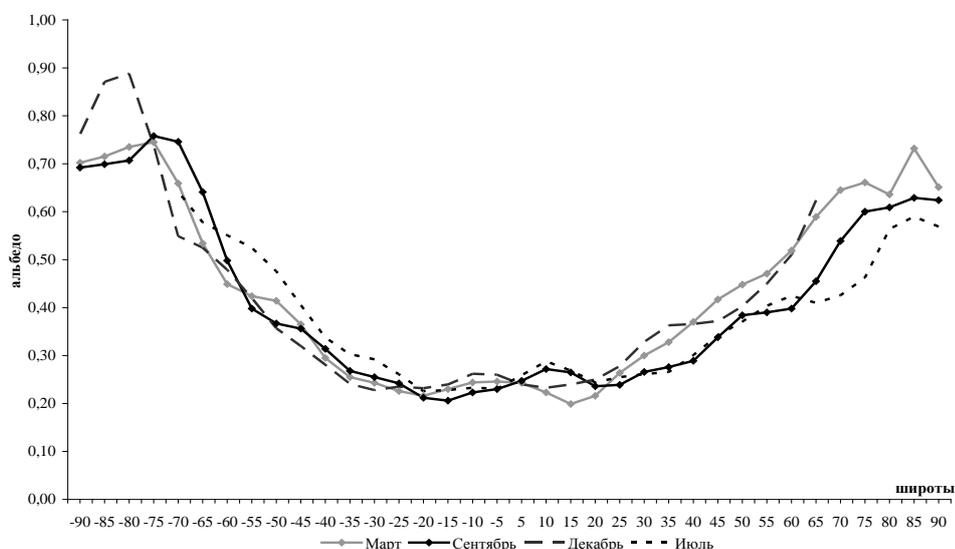


Рисунок 6. Широтное распределение среднемесячных значений альbedo в 1986 г. ИСЗ «Nimbus-7»

Далее в главе приводится методика получения глобального альбедо. Известно, что глобальное альбедо играет важную климатообразующую роль, так как эта величина определяет приходную часть радиационного баланса Земли. Для лучистого обмена Земли с космосом оцениваются потоки на верхней границе атмосферы (ВГА).

Принято считать, что в среднем за год Земля находится в состоянии лучистого равновесия, то есть глобальный радиационный баланс на ВГА за год равен нулю. Для проверки этого положения необходимо знать глобальную среднегодовую поглощенную радиацию, а для ее расчетов требуется знание глобальных среднегодовых величин альбедо. По данным о зональных среднемесячных величинах альбедо можно получить глобальные величины, а также рассчитать среднемесячные и среднегодовые значения для северного и южного полушарий. Предложен следующий метод решения такой задачи.

$$\alpha_{\text{г,л}} = \frac{1}{4\pi} \sum_{\theta_i=0^{\circ}}^{\theta_i=175^{\circ}} \omega_i \alpha_i \quad \text{для глобального альбедо,} \quad (10)$$

$$\alpha_{\text{N,г,л}} = \frac{1}{2\pi} \sum_{\theta_i=0^{\circ}}^{\theta_i=175^{\circ}} \omega_i \alpha_i \quad \text{для северного полушария, аналогично для южного, при } \theta_i \text{ от } 90^{\circ} \text{ до } 175^{\circ}.$$

Величины  $\omega_i$  являются весовыми коэффициентами для расчетов альбедо и находятся по формуле:

$$\omega_i = \int_{\lambda=0}^{2\pi} \int_{\theta_i}^{\theta_{i+5^{\circ}}} \sin \theta \, d\theta \, d\lambda = 2\pi (\cos \theta_i - \cos \theta_{i+5^{\circ}}) \quad (11)$$

где  $\theta_i$  – отсчитывается от северного полюса Земли, при этом  $\theta_i$  – кратно  $5^{\circ}$ , т.е.  $\theta_i = 0^{\circ}; 5^{\circ}; 10^{\circ} \dots 85^{\circ}$  для северного полушария и  $0^{\circ}; 5^{\circ}; 10^{\circ} \dots 175^{\circ}$  для Земли в целом. Зональные значения  $\alpha_i$  выбираются из среднемесячных величин альбедо соответствующих широтных зон таблиц атласов.

Анализ полученных данных показывает следующее.

1. Глобальное альбедо имеет практически правильный полугодовой ход: минимальное значение в январе, максимальное в марте, снова минимум в июне, затем подъем до сентября – октября и минимум в декабре.

По полушариям картина иная. Почти точный полугодовой ход в южном полушарии и значительная асимметрия в северном полушарии. Такое распределение глобального альбедо объясняется значительной разницей в характере подстилающей поверхности СП и ЮП. Преимущественно материковая поверхность в СП и преимущественно открытый океан в ЮП. Например, после быстрого роста альбедо с августа по ноябрь в СП, к марту альбедо достигает максимума. Затем таяние, сход снежного покрова, быстрое уменьшение альбедо, которое носит затяжной характер в СП до августа включительно.

2. Нельзя не заметить значительной разницы в величинах глобального альбедо между данными от ИСЗ «Нимбус-6» и «Нимбус-7». Среднегодовые величины глобальных альбедо между этими спутниками отличаются практически точно на 5 единиц альбедо: 0,281 для «Нимбус-6» и 0,330 для «Нимбус-7», хотя среднегодовые величины для каждого спутника очень близки. Разница в глобальных величинах  $\Delta\alpha_{\text{гл}} = 0,05$  существенно превышает погрешности определения глобальных альбедо. Наш анализ показывает, что считать этот сводный ряд однородным невозможно, имеется систематическая разница в данных.

Поглощенная солнечная радиация является приходной частью РБЗ. Выше мы уже обсуждали методику получения среднесуточных величин поглощенной радиации (см. формулы 7-9).

Для получения среднемесячных значений поглощенной радиации в формулу (7) нужно подставить среднемесячные значения приходящей радиации на ВГА и альbedo. В работе была рассчитана приходящая солнечная радиация двумя методами: 1) по формуле Миланковича, для верхней и нижней параллелей (границ зон), и взято их среднее; 2) по формуле Миланковича со средним значением широты данной зоны. Приходящая радиация, рассчитанная по широтам границ зон, отличается от величин приходящей радиации, рассчитанной по средним значениям широты, не более чем на 0,1%. Поэтому в дальнейших расчетах используются данные, рассчитанные по средним значениям широты.

Для оценки вариаций глобальных величин поглощенной солнечной радиации, а также ее полушарных значений можно применить аналогичную методику, как и в случае с расчетами глобальных и полушарных величин альbedo. Используя те же значения среднемесячных величин зональных альbedo, можно записать следующие очевидные соотношения:

$$Q_{\Sigma} = \frac{1}{4\pi} \sum_{\theta_i=0^{\circ}}^{\theta_i=1^{\circ} 5'} \omega_i E_i (1 - \alpha_i) \text{ для глобального значения,}$$

$$Q_{N,S} = \frac{1}{2\pi} \sum_{\theta_i=0^{\circ}}^{\theta_i=8^{\circ} 5'} \omega_i E_i (1 - \alpha_i) \text{ для северного полушария, и аналогично, для южного.}$$

Здесь обозначения те же, что и в (10), а  $E_i$  – зональные величины приходящей радиации.

Глобальное значение поглощенной радиации в течение года меняется не очень сильно. Имеется два небольших максимума в марте и сентябре, и минимум в июне-июле. На глобальное распределение поглощенной радиации большое влияние оказывают полушарные распределения. В северном полушарии минимум значений приходится на зимние месяцы (декабрь-январь), а максимум на летние (июнь-июль). В южном полушарии также минимум значений приходится на зимние месяцы, а максимум на летние. Причем в южном полушарии значение максимума больше чем в северном полушарии, а минимума меньше. Атласы УДР содержат данные за 1979 – 1984 гг. и 1985 -1987 гг. Анализ среднеглобальных среднемесячных значений УДР выявил, что в холодное полугодие наблюдаются минимальные среднеглобальные значения УДР около 232 Вт/м<sup>2</sup>. Максимальные величины около 238 Вт/м<sup>2</sup> наблюдаются в июне – августе. Это можно объяснить преобладанием материков в северном полушарии, более нагретых летом и преобладанием океанов в южном полушарии.

Одной из задач настоящего исследования было оценить вклад в УДР каждого из полушарий в отдельности. Эту задачу можно решить, используя имеющиеся в атласах данные о среднемесячных глобальных величинах УДР ( $L_{cp}$ ) и о разности среднемесячных полушарных значений ( $L_N - L_S = \Delta L$ ). Мы применили следующую методику.

$$L_N = 2L_{cp} - L_S \text{ и } L_N = \Delta L + L_S; \text{ Отсюда } L_S = L_{cp} - \frac{\Delta L}{2}$$

По этим формулам рассчитывались значения УДР для северного и южного полушарий.

Анализ данных показал, что амплитуда изменений УДР в СП достигает 16-17 Вт/м<sup>2</sup>, а в южном около 6 Вт/м<sup>2</sup>. Очевидно, это следствие различия в поверхностях

полушарий. На материках СП большую роль играет наступление и сход снежного покрова. Поверхность суши быстрее и сильнее прогревается, чем океан. Максимум УДР в СП приходится не на июнь, а на июль-август месяцы. Этот сдвиг почти в точности отражает уменьшение глобального альbedo СП, которое продолжается до августа месяца. А это приводит к росту поглощенной радиации и, соответственно, к росту УДР. Также прослеживается снижение в СП уровня УДР с 247 Вт/м<sup>2</sup> в 1979 г. до 242 и менее Вт/м<sup>2</sup> в 1986-87 гг. При этом в ЮП уровень УДР практически остается одинаковым. В обоих полушариях проявилось крупное изменение УДР в октябре 1983 г. Это свидетельствует о том, что масштабы явления Эль-Ниньо 1983-84 гг. таковы, что затронули оба полушария синхронно.

После завершения всех изложенных выше исследований можно оценить выполнение условия равенства нулю среднеглобального среднегодового радиационного баланса Земли на ВГА. К сожалению, выбор данных весьма ограничен. Есть всего два года где имеются парные данные: 1986 и 1987. Однако в 1986 г. нет данных за май месяц, а в 1987 г. за 2 месяца, ноябрь и декабрь. Но за 2 предыдущих года показания за эти месяцы были одинаковы с разницей менее 0,1%, и мы их использовали в 1987 г. С такими замечаниями результаты выглядят следующим образом.

Среднегодовое значение поглощенной радиации с формулой Миланковича получается больше, чем методом радиационного воздействия почти точно на 7 Вт/м<sup>2</sup>. В 1987 г. УДР по данным атласа в среднем за год составляет 232,48 Вт/м<sup>2</sup>, а рассчитанное значение методом «свертки» поглощенной радиации 236,2 Вт/м<sup>2</sup>. Разница всего 1,6%. С правдоподобными коррекциями в 1986 г. величина разницы тоже близка к этому. Можно считать, что для ИСЗ «Nimbus-7» РБЗ за эти годы близок к нулю.

А для ИСЗ «Nimbus-6» картина иная. При любой возможной экстраполяции данных на 1975-77 годы УДР оказывалась меньше поглощенной радиации на 6-8 процентов. По-видимому, это следствие отмеченного ранее различия в альbedo.

**В главе 4** приведены характеристика наблюдательного материала с ИСЗ «Ресурс-01» №4 и анализ материала наблюдений. Одной из задач диссертации являлось построение атласа наблюдений с помощью аппаратуры ИКОР с гелиосинхронного ИСЗ «Ресурс-01» №4. Спутник «Ресурс-01» №4 за время своего активного существования с июля 1998 г. по апрель 1999 г. работал в режиме отладки. Радиометрическая аппаратура включалась нерегулярно. Измерения проводились всего в течение 109 наблюдательных суток, распределенных по 8 месяцам. В распоряжении были данные за отдельные месяцы неполного года работы ИСЗ (после чего он прекратил выдачу данных).

Отсчеты производились ежеминутно. Всего за рабочий период получено 86034 отдельных измерения УКР (соответственно альbedo). В данном эксперименте в большинстве месяцев обеспечивалось глобальное покрытие наблюдениями земной поверхности. А это главное условие возможности построения карт.

Была произведена обработка всех данных. Преследовались две цели: отработать создаваемые программы счета на данном материале и сравнить полученные результаты с аналогичными результатами обработки атласов США. В результате обработки первичных материалов измерений радиометром ИКОР создана база данных (БД) мгновенных значений УКР и альbedo и дополнительной орбитальной информации. Получение мгновенных величин УКР и альbedo велось отработанным методом «фактора формы».

Для обработки результатов была создана программа визуализации «ИКОР-М», которая позволяет визуально просматривать информацию, полученную со спутника: выводить на экран данные об УКР, альbedo в течение дневной части витка, а также выводить дополнительную информацию; производить построение графиков временного

распределения следующих величин: текущие отсчеты аппаратуры ИКОР, величины УКР и альbedo для каждого отсчета, широты и долготы подспутниковой точки; производить построение графиков широтного распределения мгновенных величин УКР, альbedo и поглощенной радиации системы Земля-атмосфера за текущий виток; строить карты распределения УКР, альbedo, как по мгновенным, так и по среднесуточным значениям, карты распределения поглощенной радиации в цветном и черно-белом вариантах; рассчитывать и выводить на экран данные о зональных среднесуточных величинах УКР, мгновенного и среднесуточного альbedo, а также поглощенной радиации.

Для построения карт глобальных распределений всех полученных величин был использован образец карты в цилиндрической проекции. Месячное осреднение как и ранее проводилось по системе ячеек равной площади  $5^\circ \times 5^\circ$ . Таким образом, весь земной шар покрывается сеткой, состоящей из 1654 ячеек. Для каждой широтной зоны можно рассчитать координаты ячеек. Для каждой ячейки с известными координатами производится выборка значений из базы данных, содержащей измерения с ИСЗ «Ресурс-01» №4. Зная координаты ячеек, легко определить тип базовой подстилающей поверхности (без облачности). Учет влияния облачности производился по методике (см. главу 1).

Получаемые из измерений мгновенные средние по ПЗ величины УКР и альbedo находят применение при построении широтных мгновенных распределений вдоль витка, при слежении за развитием различных образований и решении других задач. Однако для климатических исследований первичный интерес представляют суточные средние УКР и альbedo. А современные атласы публикуются, как правило, с использованием среднесуточных величин, получаемых из среднесуточных. Кроме того, эти же величины используются при расчетах суточных и среднесуточных значений поглощенной радиации, как одного из основных компонентов радиационного баланса Земли (РБЗ).

По рассчитанным среднесуточным значениям альbedo были получены среднесуточные их значения, осредненные по ячейкам упоминавшейся глобальной сетки. Построены карты среднесуточных значений по мгновенным и среднесуточным величинам альbedo за весь период наблюдений ИСЗ «Ресурс-01» №4. Пример карты приведен на рисунке 7.

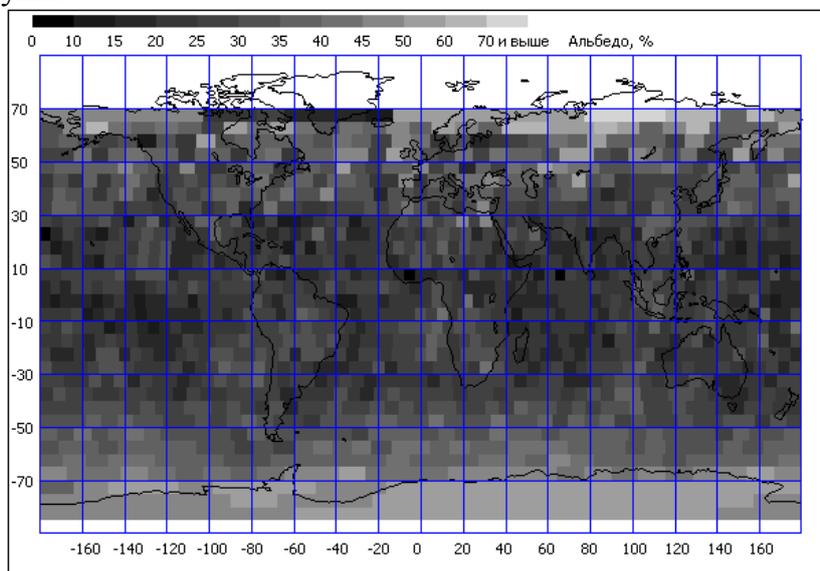


Рисунок 7 Карта распределений альbedo по среднесуточным значениям за декабрь 1998г. с ИСЗ «Ресурс-01» №4.

Наличие в ряде месяцев за 1998-99 гг. глобального покрытия наблюдениями в течение нескольких суток (от 3 до 8) позволило решить задачу построения карт изолиний. Была разработана и применена методика построения карт изолиний альбедо. Наилучшие совпадения отмечены для рядов разложения, включая гармоники степени и порядка 13.

Карты распределений альбедо и изолиний позволяют оценивать внутригодовую изменчивость альбедо в любых регионах. При достаточно длинных рядах наблюдений карты обеспечат возможность следить за межгодовой изменчивостью альбедо для каждого месяца, сезона, региона, оценивать возможные тренды, отклонения от среднего за рассматриваемый период наблюдений. Карты распределений альбедо позволяют также отслеживать такие события, как Эль-Ниньо – Южное колебание, Ла-Ниньо, другие крупномасштабные явления.

По полученным результатам расчетов поглощенной солнечной радиации также были построены соответствующие карты распределения. Пример карты приведен на рисунке 8.

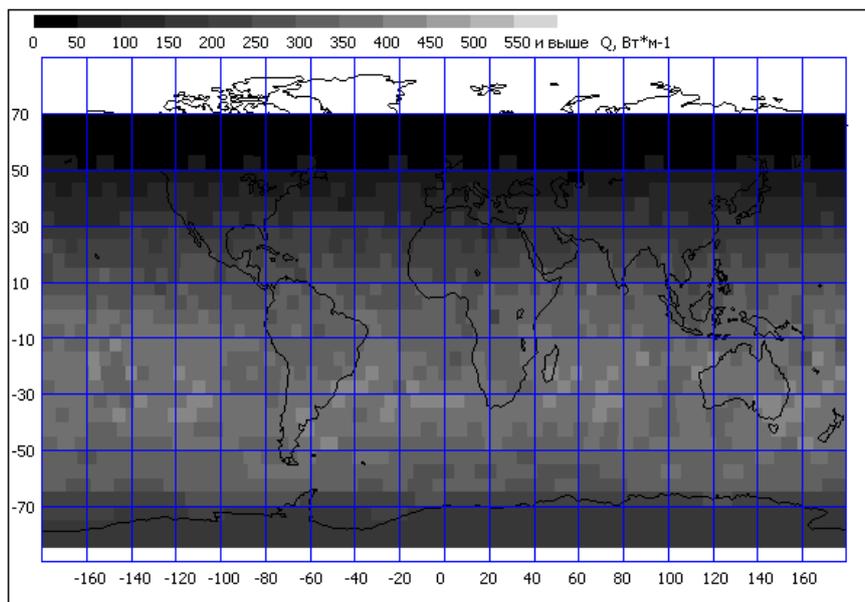


Рисунок 8. Карта распределения поглощенной радиации за декабрь 1998 г. по данным ИСЗ «Ресурс-01» №4

Рассчитаны среднемесячные зональные величины для пятиградусных широтных зон, которые позволяют оценивать среднеглобальные среднемесячные значения альбедо, сравнивать данные с материалами опубликованных атласов.

Были построены графики широтного распределения альбедо. Анализ показал, что в тропической зоне (широты от  $-25^{\circ}$  до  $+25^{\circ}$ ) в любой сезон величины альбедо имеют минимальные значения, и группируются около 0,25 - 0,30. Исключение составляет февраль 1999 г. В данном месяце значения альбедо отмечались в пределах 0,25. Возможно, это связано с наблюдавшимся в этот период явлением Ла-Ниньо. При приближении к полюсам в обоих полушариях альбедо растет, причем рост альбедо отражает сезонные особенности и соответствует увеличению зенитного угла Солнца.

Пользуясь разработанным методом «свертки» можно по среднемесячным зональным величинам получить глобальные и полушарные. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Глобальное распределение альбедо

Год/месяц	1998			1999			
	август	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель
СП	0,331	0,319	0,321	0,330	0,305	0,348	0,362
ЮП	0,317	0,344	0,342	0,327	0,304	0,358	0,348
Глоб.	0,324	0,331	0,332	0,328	0,305	0,353	0,355

Аналогично были получены данные о поглощенной радиации. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Глобальное распределение поглощенной радиации, Вт/м<sup>2</sup>

Год/месяц	1998			1999			
	август	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель
СП	275,285	167,613	149,714	165,247	202,452	232,187	244,453
ЮП	175,227	297,801	314,105	311,084	296,597	230,007	206,346
Глоб.	225,256	232,707	231,909	238,165	249,524	231,097	225,399

**В заключении** приводятся основные результаты и выводы работы:

1. Разработан метод и проведены расчеты получения среднесуточных и среднемесячных величин альбедо. Детально рассмотрена задача получения среднесуточных величин альбедо в приполярных широтах. Разработан алгоритм, составлены: «Программа расчетов среднесуточных альбедо Альбедометр» и «Программа анализа данных спутникового измерителя ИКОР-М», зарегистрированные установленным порядком.

2. Проведена детальная оценка условий наблюдений земной поверхности радиометром ИКОР с орбиты гелиосинхронного ИСЗ «Ресурс-01» №4 и для надирных радиометров с различных ИСЗ. Для оценки условий наблюдаемости земной поверхности была создана программа расчетов. Разработанный нами метод дает возможность рассчитать условия наблюдаемости земной поверхности для подспутниковой точки (центра ПЗ) радиометра при любой ориентации орбиты, относительно меридиана Солнца. В диссертации приведены примеры оценок для всех основных возможных положений орбиты: спутник с восходящим узлом на освещенной стороне Земли, ИСЗ полуденный, ИСЗ послеполуденный, ИСЗ утренний или вечерний.

3. Выполнен детальный анализ атласов NASA США. Отметим основные особенности в широтном распределении альбедо:

С увеличением широты в обоих полушариях альбедо растут, что в значительной степени определяется увеличением зенитных углов Солнца с ростом широты, большим вкладом облачности в средних и высоких широтах и наличием снежного (ледяного) покрова в высоких широтах вблизи полюсов. В обоих полушариях кривые роста альбедо отражают также и сезонные особенности, связанные с условиями облучения земной поверхности солнечной радиацией. Во все годы и сезоны величины альбедо над Антарктидой (-75°...-90°) выше, чем соответствующие величины в северных полярных широтах. В северном полушарии (СП) величины альбедо в зимне-весенний период (декабрь-март) и летне-осенний (июнь-сентябрь) различаются значительно больше, чем соответствующие по сезону величины в южном полушарии. В тропических широтах (от -25° до +25°) в любой сезон величины альбедо минимальны, имеют небольшой разброс и группируются около 0,20 для ИСЗ Nimbus-6 и около 0,25 для ИСЗ Nimbus-7.

Это указывает на незначительные изменения количества облачности в среднемесячных значениях в экваториальной зоне.

4. Разработана методика и получены среднемесячные и среднегодовые глобальные величины альbedo и поглощенной радиации по зональным данным атласов. Результаты анализа показали, что глобальное альbedo имеет практически правильный полугодовой ход: минимальное значение в декабре-январе, максимальное в марте, снова минимум в июне, затем подъем до сентября– октября и минимум в декабре. По полушариям картина иная. Почти точный полугодовой ход в южном полушарии с достаточно хорошей привязкой к ключевым датам – равноденствиям и солнцестояниям и значительная асимметрия в северном полушарии. Так, фаза уменьшения глобального альbedo в СП длится 6 месяцев (март - август). Такое распределение глобального альbedo объясняется значительной разницей в характере подстилающей поверхности СП и ЮП.

5. Глобальное значение поглощенной радиации в течение года меняется не очень сильно. Имеется два небольших максимума в марте и сентябре, и минимум в июне-июле. На глобальное распределение поглощенной радиации большое влияние оказывают полушарные распределения. Причем в южном полушарии значение максимума больше чем в северном полушарии, а минимума меньше.

6. Проведено сравнение полученных результатов расчетов поглощенной радиации, с использованием формулы Миланковича и методом радиационного воздействия. Отметим, что среднегодовое значение поглощенной радиации методом «свертки» (с формулой Миланковича) получается больше, чем методом радиационного воздействия. Разница составляет около  $7 \text{ Вт/м}^2$ . Устойчивость этого значения для разных лет и различной спутниковой аппаратуры позволяет считать, что эта разница  $7 \text{ Вт/м}^2$  и есть та поправка к приближенному методу «радиационного воздействия», используемому для оценок поглощенной радиации. Отметим, что значения поглощенной радиации, полученные методом «свертки», более близки к глобальным значениям УДР из атласов.

7. Были рассчитаны значения УДР для северного и южного полушарий. По полученным значениям УДР можно сделать ряд заключений:

Амплитуда изменений УДР в СП значительно больше, чем ЮП. В северном она достигает  $16-17 \text{ Вт/м}^2$ , а в южном около  $6 \text{ Вт/м}^2$ . Очевидно, это следствие различия в поверхностях полушарий. Отчетливо видно, что максимум УДР в СП приходится не на июнь, а на июль-август месяцы. Этот сдвиг почти в точности отражает поведение глобального альbedo СП. Прослеживается снижение в СП уровня УДР с  $247 \text{ Вт/м}^2$  в 1979 г. до  $242$  и менее  $\text{Вт/м}^2$  в 1986-87 гг. При этом в ЮП уровень УДР практически остается одинаковым. В обоих полушариях проявилось крупное изменение УДР в октябре 1983г. Это свидетельствует о том, что масштабы явления Эль-Ниньо 1983-84 гг. таковы, что затронули оба полушария синхронно.

8. Создана «Программа анализа данных спутникового измерителя «ИКОР-М». Рассчитаны значения альbedo, поглощенной радиации. Создан макет атласа составляющих радиационного баланса Земли по данным ИСЗ «Ресурс-01» №4. Предварительный анализ показывает, что с учетом неполного покрытия наблюдениями и краткости в целом периода работы ИСЗ, основные характеристики, полученные по данным атласа, достаточно близко соответствуют результатам, полученным на основе анализа атласов NASA США.

#### **По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. Ю.А.Скляров, Ю.И.Бричков, А.И.Котума, Н.В.Фомина. Метод получения среднесуточных значений альbedo с использованием спутниковых направленных

- моделей // Материалы Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» ИКИ РАН 2003. С. 60
2. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Фомина Н.В., Котума А.И., Семенова Н.В. Определение среднесуточных величин альbedo с использованием спутниковых направленных моделей. // Исследование Земли из космоса. 2005. №3. С. 13-21.
  3. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Фомина Н.В., Котума А.И., Семенова Н.В. Оценка наблюдаемости земной поверхности для надирных радиометров с различных ИСЗ // Исследование Земли из космоса. 2006. №2. С. 1-8.
  4. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Фомина Н.В., Котума А.И., Семенова Н.В. Определение поглощенной солнечной радиации на верхней границе атмосферы по спутниковым измерениям. // Тезисы докладов Третьей открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» М., ИКИ РАН. 2005. С.37.
  5. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Фомина Н.В., Котума А.И., Семенова Н.В. О наблюдаемости поверхности Земли с гелиосинхронных ИСЗ радиометрами, ориентированными в надир. // Тезисы докладов на Четвертой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2006. С.43.
  6. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Фомина Н.В., Семенова Н.В., Кудряшов Д.А. О согласованности величин глобального альbedo по данным атласов наблюдений с ИСЗ «Нимбус-6» и «Нимбус-7». // Тезисы докладов на Четвертой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2006. С.44.
  7. Скляр Ю.А., Бричков Ю.И., Фомина Н.В., Семенова Н.В. О разрешающей способности среднеугольных радиометров. // Тезисы докладов на Пятой Юбилейной Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2007. С.111.
  8. Скляр Ю.А., Фомина Н.В., Котума А.И., Семенова Н.В. Альbedo, поглощенная солнечная радиация и уходящая длинноволновая радиация по материалам атласов NASA США // Известия Саратовского университета. Серия Науки о Земле. 2009. Вып. 1. Т. 9. С. 44-55.
  9. Скляр Ю.А., Фомина Н.В., Котума А.И., Семенова Н.В. Об особенностях определения среднесуточных величин альbedo в высоких широтах // Известия Саратовского университета. Серия Науки о Земле. 2009. Вып. 1. Т. 9. С. 56-60.
  10. Скляр Ю.А., Фомина Н.В. Составляющие радиационного баланса Земли по материалам атласов NASA США // Труды Всероссийской научной конференции с международным участием «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований» Казань: Изд-во «Отечество». 2009. Т. 2. С. 200-204.
  11. Скляр Ю.А., Фомина Н.В. К вопросу об оценке среднесуточных величин альbedo в высоких широтах // Труды Всероссийской научной конференции с международным участием «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований» Казань: Изд-во «Отечество». 2009. Т. 2. С. 195-199.
  12. Котума А.И., Скляр Ю.А., Фомина Н.В. Программа анализа данных спутникового измерителя ИКОР-М. Свидетельство № 2009612383 от 12 мая 2009 г.
  13. Котума А.И., Скляр Ю.А., Фомина Н.В. Программа расчета среднесуточного альbedo АЛЬБЕДОМЕТР. Свидетельство № 2009612384 от 12 мая 2009 г.