



построение карт комплексных морфометрических показателей, базисных и остаточных поверхностей, а также других параметров рельефа. В дальнейшем также планируется применить апробированную методику построения моделей к моделированию бассейнов крупных рек Саратовской области.

#### Библиографический список

1. Погорелов А.В., Салгагаров А.Д., Киселев Е.Н., Куркина Е.В. Геоинформационный метод в практике региональных физико-географических исследований // Тр. / Тебердинский государственный заповедник. Кисловодск, 2007. Вып. 45. 200 с.
2. Мильков Ф.Н. Бассейн реки как парадинамическая ландшафтная система и вопросы природопользования // География и природные ресурсы. 1981. № 4. С. 11–18.
3. Природа Саратовской области / Под ред. П.С. Кузнецова. Саратов, 1956. 136 с.
4. Проект районной планировки Вольского административного района Саратовской области: В 3 т. Т. 1. Пояснительная записка. Саратов, 1984. 398 с.
5. Энциклопедия Саратовского края (в очерках, фактах, событиях, лицах). Саратов, 2002. 688 с.
6. Maidment D., Djokic D. Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems. Redlands, California, 2000. 232 p.
7. Farr T.G., Hensley S., Rodriguez E. et al. The shuttle radar topography mission // CEOS SAR Workshop. Toulouse 26–29 Oct. 1999. Noordwijk, 2000. P. 361–363.
8. <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3>
9. Муравьев Л.А. Высотные данные SRTM против топографической съемки // <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1177761>
10. Погорелов А.В., Думит Ж.А. Морфометрия рельефа бассейна реки Кубани: некоторые результаты цифрового моделирования // Географические исследования Краснодарского края. Краснодар, 2007. Вып. 2. С. 7–23.

УДК 528.833

## АЛЬБЕДО, ПОГЛОЩЕННАЯ СОЛНЕЧНАЯ РАДИАЦИЯ И УХОДЯЩАЯ ДЛИННОВОЛНОВАЯ РАДИАЦИЯ ПО МАТЕРИАЛАМ АТЛАСОВ NASA США

Ю.А. Скляр, Н.В. Фомина, А.И. Котума, Н.В. Семенова

Саратовский государственный университет,  
кафедра метеорологии и климатологии  
E-mail: kafmeteo@sgu.ru

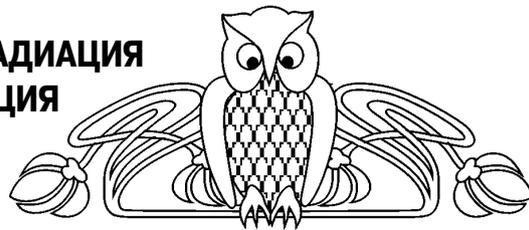
Приводятся результаты исследований основных составляющих радиационного баланса Земли (РБЗ) на основе данных наблюдений со спутников Nimbus-6 и Nimbus-7, опубликованных в четырех атласах NASA. Изложены результаты анализа широтных распределений альbedo. Предложена методика получения глобальных и полушарных величин альbedo. Показано, что среднеглобальные величины альbedo у ИСЗ Nimbus-6 на 5 единиц меньше, чем у ИСЗ Nimbus-7 (0,28 и 0,33 соответственно). Обсуждены внутригодовые и межгодовые вариации глобальных и полушарных величин альbedo. По разработанной методике получены данные о поглощенной радиации. Выполнен анализ данных об уходящей длинноволновой радиации, в том числе по полушариям. Приведена оценка близости к нулю глобального среднегодового РБЗ.

**Ключевые слова:** альbedo, поглощенная радиация, уходящая длинноволновая радиация, радиационный баланс Земли, атласы.

#### Albedo, Absorbed Solar Radiation and Outgoing Longwave Radiation Derived from Data of NASA Atlases

Yu. A. Sklyarov, N. V. Fomina, A. I. Kotuma, N. V. Semenova

The results of investigation of main Earth radiation budget (ERB) components derived from the measurement on the Nimbus-6 and Nimbus-7 satellites and published in four NASA atlases are given. The data of latitudinal albedo distribution are described. The methodic for receiving of global and hemisphere values of albedo is proposed. It



is showed that global averaged albedo values from Nimbus-6 satellite are less than from Nimbus-7 at 5 albedo units (0,28 and 0,33 correspondingly).

The annual variations of global and hemispherical albedo values are discussed. The absorbed radiation data were received and peculiarities of their variation are given. Analysis of data about outgoing longwave radiation was fulfilled. Evaluation of proximity to zero of global annually averaged ERB was made.

**Key words:** albedo, absorbed solar radiation, outgoing longwave radiation, Earth radiation budget, atlases.

В Саратовском государственном университете несколько десятилетий ведутся работы по исследованию компонентов радиационного баланса Земли (РБЗ). Разработанная аппаратура для измерений уходящей коротковолновой радиации (УКР) и солнечной постоянной (главный конструктор профессор Ю.А. Скляр) работала на высотных аэростатах [1], на трех ИСЗ, в том числе на двух в совместных российско-французских проектах [2, 3]. Получен большой объем данных. Практически завершена обработка наблюдений с ИСЗ «Метеор-3» № 7 и «Ресурс-01» № 4. Завершается подготовка материалов атласа наблюдений УКР, альbedo и поглощенной солнечной радиации по материалам наблюдений с ИСЗ «Ресурс-01» № 4 (получено более 86 000 наблюдений). Рассмотрены вопросы построения карт распределений, получения среднесуточных величин альbedo, наблюдаемости поверхности Земли с гелиосинхронных ИСЗ [4–6]. Завершено изготовление



модернизированных радиометров для установки на перспективные ИСЗ «Метеор-М» (ориентировочный срок старта – первая половина 2009 г.) и на геостационарный ИСЗ «Электро-Л». В 2007 г. на указанные работы Саратовским государственным университетом получена лицензия на право ведения космической деятельности.

В такой ситуации большой интерес представляет анализ 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 имеют параметры, близкие к параметрам орбиты российского ИСЗ «Ресурс-01» № 4, поэтому можно сравнивать результаты наблюдений с нашим радиометром ИКОР. Всего в нашем распоряжении оказалось 4 атласа, которые были переданы Ю.А. Скиярову ведущим специалистом NASA Д.Л. Смитом. В пояснительных текстах авторы атласов отмечали, что материалы атласов дают большие возможности для целого ряда исследований, в чем мы убедились в процессе анализа материалов атласов. Ниже будут изложены основные результаты проделанной работы.

Следует отметить необычную структуру подачи материалов атласов. Два атласа альbedo и поглощенной солнечной радиации [7, 8] представляют собой в основном карты глобальных распределений обоих параметров. Кроме того, в каждом атласе приведены сводные таблицы среднемесячных альbedo для широтных зон с шагом 5° по широте. Эти данные позволили нам выполнить обширные исследования, касающиеся как альbedo, так и поглощенной солнечной радиации.

Вместе с тем атласы уходящей длинноволновой радиации (УДР) также представляют карты глобальных распределений УДР на каждый месяц [9, 10]. Эти данные сопровождаются таблицами

сферических гармонических коэффициентов разложения на каждый месяц. Из всех коэффициентов три имеют физический смысл: глобальное среднемесячное значение УДР, разность средне-глобальных величин УДР Северного и Южного полушарий (Северное минус Южное) и градиент у экватора распределения УДР (экватор – полюс). Эти данные также широко использовались для различных исследований. Ценность полученных выводов в том, что они опираются на реальные величины измерений с двух успешных спутниковых проектов, составивших вместе длительный ряд компонентов РБЗ. Это и дало возможность проследить за многолетними вариациями соответствующих величин. Конечно, одной из важнейших задач данного исследования явилась возможность проверки на материалах измерений условия равенства нулю РБЗ на верхней границе атмосферы (ВГА). Однако, все по порядку.

### Широтное распределение альbedo

Имеющиеся у нас атласы альbedo и поглощенной радиации представляют данные за 1975–78 гг. (спутник Nimbus-6) и 1985–1986 гг. (спутник Nimbus-7). По таблицам среднемесячных величин альbedo для облегчения анализа строились графики распределений за соответствующий месяц. Графики широтных распределений среднемесячных величин альbedo за 1976 и 1986 гг. приведены на рис. 1 и 2. Графики даны для наиболее характерных месяцев – марта, июня, сентября и декабря. За все остальные годы распределения похожи на приведенные и отличаются в незначительных деталях.

Отметим основные особенности:

– с увеличением широты в обоих полушариях альbedo растут, что отражает сезонные особенности и соответствует увеличению зенитного угла Солнца;

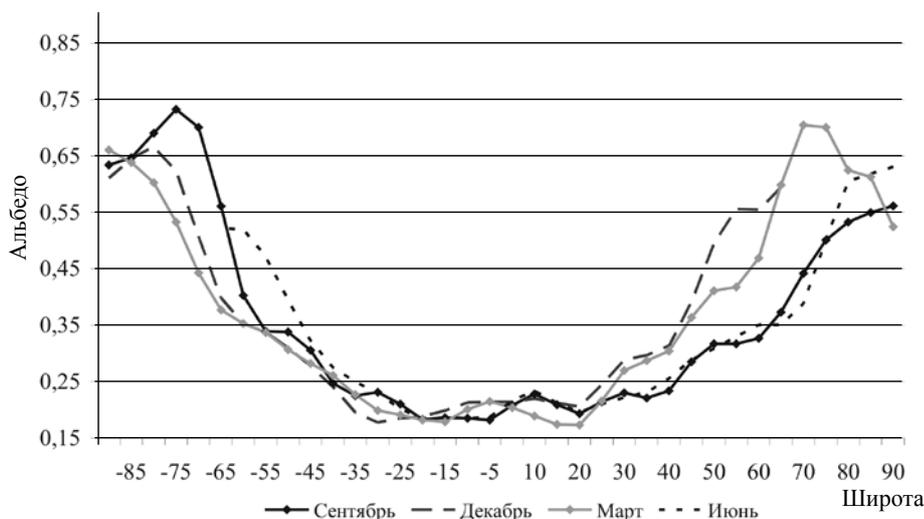


Рис. 1. Широтное распределение среднемесячных значений альbedo в 1976 г.

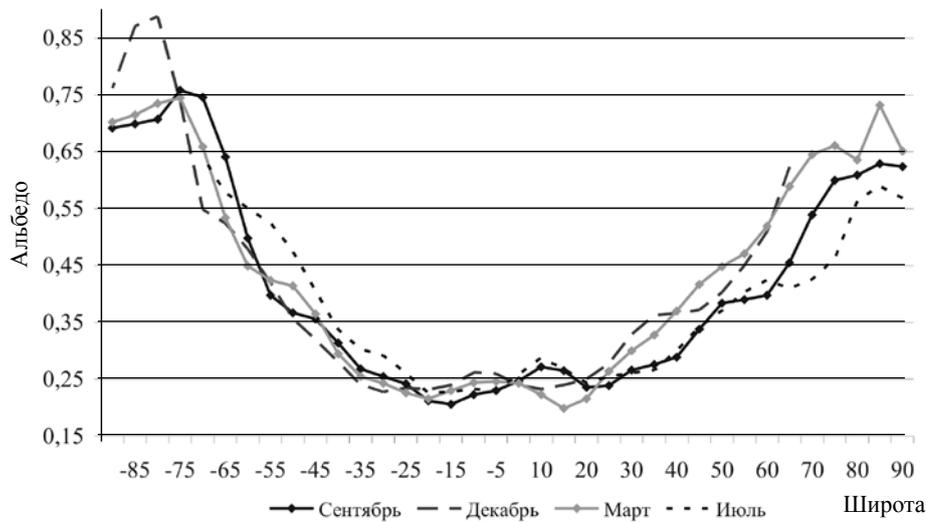


Рис. 2. Широтное распределение среднемесячных значений альbedo в 1986 г.

– в тропических широтах (грубо от  $-25$  до  $+25^\circ$ ) 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  $+5^\circ \dots +20^\circ$  в июне и сентябре, минимум в марте и частично в декабре. Аналогично наблюдается вторичный максимум в зоне  $-5^\circ \dots -15^\circ$  в декабре-марте. Такие изменения обычно связывают с облачностью внутритропической зоны конвергенции (ВЗК);

– во все годы и сезоны величины альbedo над Антарктидой ( $-75^\circ \dots -90^\circ$ ) 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  $80^\circ$  и  $85^\circ$  Южного полушария (ЮП), где они составляют 0,87 и 0,89, что существенно выше величин альbedo, принятых в моделях США [11], см. также в [1, 5].

### Расчет глобальных величин альbedo и их вариации

Глобальное альbedo играет важную климатообразующую роль, так как эта величина определяет приходную часть радиационного баланса Земли.

Если известно глобальное альbedo ( $\alpha_{гл}$ ), то тем самым известна поглощаемая Землей солнечная радиация (приходная часть), доля которой равна  $(1-\alpha_{гл})$  от приходящей на всю земную поверхность солнечной радиации в расчете на  $1 \text{ м}^2$ . Для лучистого обмена Земли с космосом оцениваются потоки на верхней границе атмосферы (ВГА). В качестве ВГА была принята поверхность сферы с высотой 30 км над поверхностью Земли. Измерения показали, что с высот, больших 30 км, практически нет нисходящих, генерируемых атмосферой лучистых потоков. На ВГА сравниваются приходящие коротковолновые потоки (лучистая энергия Солнца) и уходящая длинноволновая радиация (УДР) как компоненты РБЗ. Принято считать, что в среднем за год Земля находится в состоянии лучистого равновесия, т.е. 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 альbedo. В атласах в виде таблиц приведены данные о зональных среднемесячных величинах альbedo. По этим данным можно получить глобальные величины, а также рассчитать среднемесячные и среднегодовые значения для Северного и Южного полушарий. Нами предложен следующий метод решения такой задачи.

Часть земного шара с необходимыми линиями и углами, где  $R_{вга}$  – радиус Земли на уровне верхней границы атмосферы,  $\theta$  – полярное расстояние площадки  $dw = dx dy$ ,  $\lambda$  – долгота площадки,  $r_i$  – радиус верхней границы широтной зоны, ширина которой по широте  $\Delta\theta_i$  равна  $5^\circ$ , как и в таблицах атласов, изображена на рис. 3.

Для того чтобы найти телесный угол широтной зоны, необходимо провести следующие расчеты:

$$dw = dx \cdot dy;$$

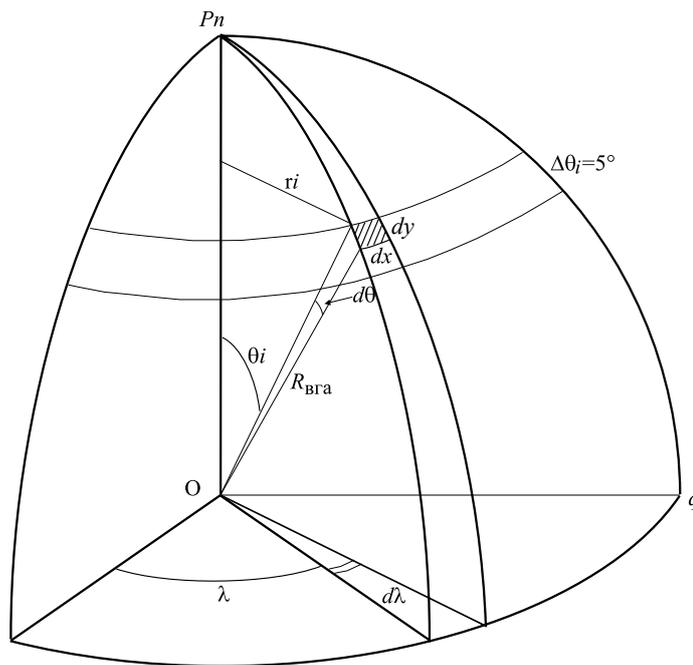


Рис. 3. Часть земного шара с необходимыми линиями и углами

$$dx = r_i d\lambda;$$

$$r_i = R_{BGA} \sin \theta_i.$$

Тогда  $dx = r_i d\lambda = R_{BGA} \sin \theta_i d\lambda$ ,  
а  $dy = R_{BGA} d\theta$  в единицах площади

$$dw = dx \cdot dy = R_{BGA}^2 \sin \theta_i d\theta d\lambda.$$

Величина  $dw$  в единицах телесного угла  $d\omega$  равна

$$d\omega = \frac{dw}{R^2} = \sin \theta_i d\theta d\lambda.$$

Интегрируя это выражение по рассматриваемой зоне, получим телесный угол  $i$ -й зоны:

$$\begin{aligned} \omega_i &= \int_{\lambda=\theta}^{2\pi} \int_{\theta_i}^{\theta_{i+5^\circ}} \sin \theta d\theta d\lambda = 2\pi \int_{\theta_i}^{\theta_{i+5^\circ}} \sin \theta d\theta = \\ &= 2\pi(-\cos \theta) \Big|_{\theta_i}^{\theta_{i+5^\circ}} = 2\pi(-\cos \theta_{i+5^\circ} + \\ &+ \cos \theta_i) = 2\pi(\cos \theta_i - \cos \theta_{i+5^\circ}), \end{aligned} \quad (1)$$

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  $\theta_i = 0^\circ; 5^\circ; 10^\circ \dots 175^\circ$  для Земли в целом.

Очевидно, полученные величины  $\omega_i$  являются весовыми коэффициентами для расчетов альbedo, так что

$$\alpha_{ГЛ} = \frac{1}{4\pi} \sum_{\theta_i=0^\circ}^{\theta_i=175^\circ} \omega_i \alpha_i \quad \text{– для глобального альbedo,}$$

$$\alpha_{NГЛ} = \frac{1}{2\pi} \sum_{\theta_i=0^\circ}^{\theta_i=85^\circ} \omega_i \alpha_i \quad \text{– для Северного полушария,} \quad (2)$$

$$\alpha_{SГЛ} = \frac{1}{2\pi} \sum_{\theta_i=90^\circ}^{\theta_i=175^\circ} \omega_i \alpha_i \quad \text{– для Южного полушария.}$$

Зональные значения  $\alpha_i$  выбираются из среднемесячных величин альbedo соответствующих широтных зон таблиц атласов.

Полученные глобальные среднемесячные значения по полушариям и по земному шару в целом, а также среднегодовые глобальные значения альbedo представлены в таблице.

По данным таблицы были построены графики внутригодовой изменчивости глобального альbedo. За период наблюдений с 1975 по 1978 г. с ИСЗ «Nimbus-6» были построены графики внутригодовой изменчивости альbedo для 1977 г. (рис. 4), так как за этот год имеется полный ряд наблюдений. В 1975 и в 1978 гг. ряд наблюдений составил всего 6 и 5 месяцев соответственно. Построить графики внутригодовой изменчивости невозможно.

За период работы ИСЗ «Nimbus-7» ряд наблюдений составил в 1985 г. 2 месяца – ноябрь и декабрь. В 1986 г. ИСЗ имел перебои в работе оборудования, данные за апрель, май, июнь отсутствуют. За 1987 г. данные есть с января по октябрь. Чтобы проследить глобальный ход ве-



Глобальное распределение альbedo

Месяц	1976			1977			1987		
	СП	ЮП	Глобал.	СП	ЮП	Глобал.	СП	ЮП	Глобал.
Январь	0,2962	0,2726	0,2844	0,3112	0,2714	0,2913	0,3437	0,3229	0,3333
Февраль	0,2989	0,2790	0,2889	0,2914	0,2749	0,2831	0,3466	0,3336	0,3401
Март	0,3225	0,2679	0,2952	0,3019	0,2830	0,2925	0,3605	0,3338	0,3472
Апрель	0,2920	0,2821	0,2870	0,2875	0,2812	0,2843	0,3382	0,3433	0,3408
Май	0,2842	0,2645	0,2743	0,2752	0,2630	0,2691	0,3321	0,3134	0,3228
Июнь	0,2744	0,2495	0,2620	0,2684	0,2498	0,2591	0,3259	0,2974	0,3117
Июль	0,2678	0,2583	0,2630	0,2626	0,2533	0,2579	0,3161	0,3173	0,3167
Август	0,2596	0,2843	0,2720	0,2582	0,2745	0,2663	0,3155	0,3340	0,3247
Сентябрь	0,2698	0,2959	0,2829	0,2716	0,2875	0,2795	0,3231	0,3412	0,3321
Октябрь	0,2906	0,2909	0,2908	0,2904	0,2890	0,2897	0,3344	0,3487	0,3415
Ноябрь	0,3018	0,2801	0,2909	0,2925	0,2847	0,2886	0,3395	0,3351	0,3373
Декабрь	0,2925	0,2718	0,2822	0,2878	0,2772	0,2825	0,3020	0,3339	0,3180
Среднее за год	0,2875	0,2747	0,2811	0,2832	0,2741	0,2787	0,3315	0,3296	0,3305

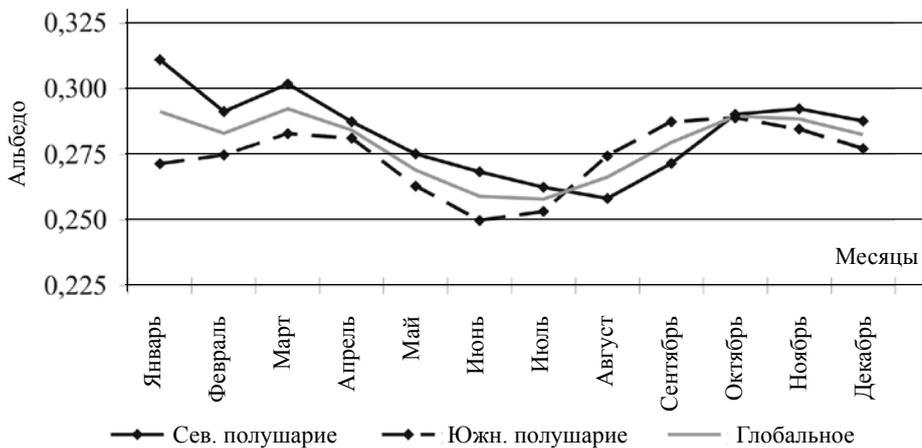


Рис. 4. Внутригодовая изменчивость глобального альbedo ИСЗ «Nimbus-6» 1977 г.

личин альbedo вначале был построен график за 1987 год. Учитывая, что данные в ноябре-декабре 1985 и 1986 гг. практически одинаковы (разница не более тысячной доли), мы добавили к 1987 г. данные за ноябрь-декабрь (рис. 5).

Анализ графиков вариаций альbedo (см. рис. 4 и 5) показывает следующее.

1. На всех рисунках глобальное альbedo 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 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), что приводит к тому, что на вторичный максимум (ноябрь) и минимум (декабрь-январь) в сумме также приходится 6 ме-

сяцев. Такое распределение глобального альbedo объясняется значительной разницей в характере подстилающей поверхности СП и ЮП – преимущественно материковая поверхность в СП и преимущественно открытый океан в ЮП.

Например, абсолютный минимум глобального альbedo в июне месяце, по-видимому, есть следствие сложения условий инсоляции и особенностей поверхности (рис. 6). В СП самый длинный день 22 июня. За полярным кругом – полярный день. Солнце имеет склонение  $+23^{\circ}27'$ . Зенитные углы Солнца в СП в средних широтах малы, что в соответствии с моделями альbedo дает небольшие его величины. Снежный покров сошел, кроме зоны полярных льдов, и альbedo почвы низкое. В ЮП вся Антарктида в зоне полярной ночи, а океан имеет низкие альbedo вплоть до бинов 7–8 [5, 11] ( $ZUC = 68-75^{\circ}$ ). Аналогично можно объяснить и другие ситуации.

Например, после быстрого роста альbedo с августа по ноябрь в СП к марту альbedo достигает

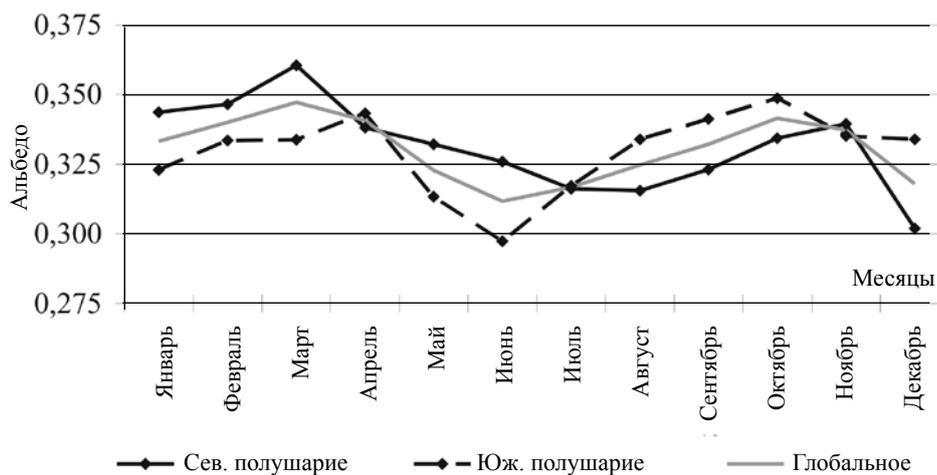


Рис. 5. Внутригодовая изменчивость глобального альbedo ИСЗ «Nimbus-7» 1987 г.

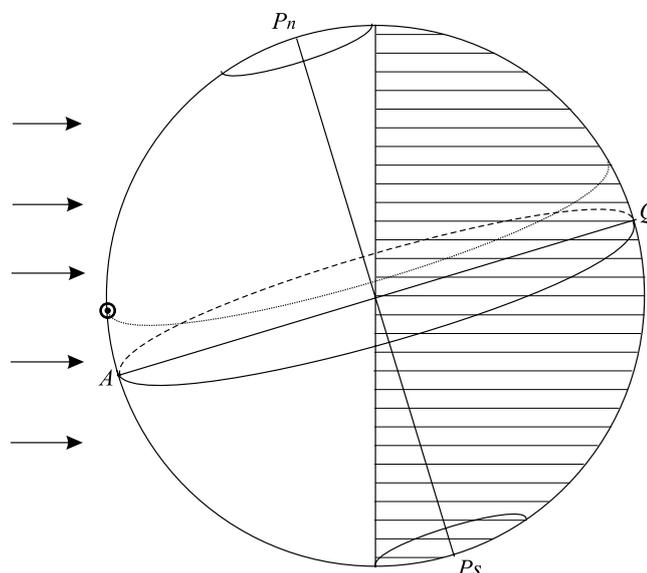


Рис. 6. Условия облучения земного шара в июне

максимума. Затем таяние, сход снежного покрова, быстрое уменьшение альbedo, которое носит затяжной характер в СП до августа включительно. В общем вариации глобального и полушарных альbedo объясняются вполне логично.

2. Нельзя не заметить значительной разницы в величинах глобального альbedo между данными от ИСЗ «Nimbus-6» и «Nimbus-7». Среднегодовые величины глобальных альbedo между этими спутниками отличаются практически точно на 5 единиц альbedo: 0,281 для «Nimbus-6» и 0,330 для «Nimbus-7», хотя среднегодовые величины для каждого спутника очень близки. Разница в глобальных величинах  $\Delta\alpha_{\text{гл}} = 0,05$  существенно превышает погрешности определения глобальных альbedo. По-видимому, величины в рядах ИСЗ «Nimbus-6» занижены на 5 единиц. Заметим, что авторы атласов отмечали, что в целом получен практически непрерывный ряд наблюдений двух

спутников. Однако наш анализ показывает, что считать этот сводный ряд однородным невозможно, имеется систематическая разница в данных. Об этом же говорит простой взгляд на графики широтных распределений среднемесячных альbedo (см. рис. 1 и 2). Сразу бросается в глаза разница в величинах альbedo тропической зоны  $-20^\circ \dots +20^\circ$ . Все кривые на рис. 1 группируются около значения 0,20, а на рис. 2 – около значения 0,25. Это надо учитывать. Мы еще вернемся к данной разнице при оценке радиационного баланса Земли.

#### Расчет приходящей и поглощенной радиации

Одной из задач, которая ставилась при анализе атласов США, было оценить, насколько выполняется близость к «нулю» среднегодового среднеглобального значения радиационного



баланса Земли (РБЗ). По построению атласов в нашем распоряжении имелись данные об альbedo в виде зональных среднемесячных значений для широтных зон с шагом в  $5^\circ$ , поглощенная радиация не давалась в виде аналогичных данных, а была представлена изолиниями на картах распределения поглощенной солнечной радиации.

Вместе с тем данные об уходящей длинноволновой радиации (УДР), которая представляет собой расходную часть уравнения радиационного баланса на ВГА, давались в виде таблиц коэффициентов разложения по сферическим гармоникам, в которых нулевой член как по столбцам, так и по строкам представлял собой среднемесячное среднглобальное значение УДР.

Для того чтобы сравнить поглощенную солнечную радиацию и УДР, т.е. оценить среднегодовой среднглобальный баланс, нужно было бы рассчитать годовые величины глобальных значений как поглощенной солнечной радиации, так и УДР. Если в отношении УДР эта задача решалась элементарно, путем суммирования среднемесячных и получения среднглобальных годовых значений, то для получения приходящей составляющей, т.е. поглощенной солнечной радиации, задача оказалась сложнее.

При этом надо было решить один принципиальный вопрос: каким методом получать среднегодовые среднглобальные величины поглощенной радиации. Один из способов описан в литературе [12] и широко используется для таких оценок. Вводится понятие о радиационном воздействии (РВ) прямой солнечной радиации в целом для ВГА Земли. Если  $E_0$  – солнечная постоянная (СП), то среднегодовое радиационное воздействие этого источника  $L_0 = E_0 \cdot 0,25 \cdot 0,7$ , где 0,25 – коэффициент, учитывающий геометрический фактор (отношение площади сечения Земли, воспринимающей поток, к площади поверхности Земли), 0,7 – коэффициент поглощения при принятом современном значении альbedo Земли 0,3. Таким образом, РВ солнечного излучения при величине  $E_0 = 1367 \text{ Вт/м}^2$  равно  $L_0 = 239,2 \text{ Вт/м}^2$ .

Если следовать этой методике, то выражение для РВ Солнца надо записать таким образом:

$$L_0 = E_0 \cdot 0,25 \cdot (1 - \alpha_{\text{гл}}),$$

где  $\alpha_{\text{гл}}$  – реальное глобальное альbedo нашей планеты в рассматриваемый период времени.

Таким образом, получив конкретное значение  $\alpha_{\text{гл}}$ , можно рассчитать величину поглощенной солнечной радиации для рассматриваемого периода (среднемесячную, среднегодовую). Очевидно, что она равна соответствующему  $L_0$ . Однако этот метод имеет существенный, принципиальный недостаток.

Получается, что реальное воздействие прямой солнечной радиации на ВГА подменяется воздействием несуществующего в природе равномерно распределенного источника излучения со средней плотностью потока равной 0,25 от величины

солнечной постоянной (для исключения влияния годовых изменений расстояния Солнце–Земля рассматривается среднегодовая величина солнечной радиации, т.е. солнечная постоянная).

Однако еще раз отметим, что реально существует единственный источник прямой солнечной радиации. Речь должна идти не о воображаемом среднглобальном значении радиации, равномерно падающей на всю поверхность ВГА, а о фактически имеющемся широтном и долготном распределении солнечного излучения по освещенной поверхности планеты. На самом деле, в любой момент на ВГА имеются всевозможные величины солнечных зенитных углов от  $0$  для площадки в подсолнечной точке до  $90^\circ$  на всей линии терминатора. А зависимость локальных альbedo от зенитного угла Солнца велика [1, 5].

Очевидно, что для расчетов величин поглощенной солнечной радиации необходимо использовать реальные значения приходящей солнечной радиации для каждой широты и использовать их для имеющихся в атласах среднемесячных значений альbedo  $5^\circ$  широтных зон. Для этих целей можно использовать формулу Миланковича, применяемую для расчета прихода сумм прямой солнечной радиации для любой широты от восхода до захода.

Поглощенная солнечная радиация является приходной частью РБЗ. Для получения ее среднесуточных значений для какой-либо площадки необходимо знать среднесуточные величины приходящего солнечного излучения  $\bar{E}$  [Вт/м<sup>2</sup>] и среднесуточные величины альbedo этой же площадки  $\alpha$ . Тогда суточное среднее поглощаемой радиации  $Q$  можно выразить как

$$Q = \bar{E}(1 - \alpha). \quad (3)$$

Величину  $\bar{E}$  можно получить, пользуясь формулой Миланковича, в виде, подходящем для расчетов среднесуточных величин  $\bar{E}$ :

$$\bar{E} = \frac{E_0}{r^2 \pi} (t_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin t_s), \quad (4)$$

где  $E_0$  – величина солнечной постоянной;  $t_s$  – выраженный в радианах часовой угол Солнца в моменты восхода, либо захода;  $r$  – текущее расстояние Земля–Солнце в астрономических единицах;  $\varphi$  – широта места;  $\delta$  – склонение Солнца. Для ВГА (нет рефракции) величина  $t_s$  находится из известного соотношения:

$$\cos t_s = -\text{tg} \varphi \cdot \text{tg} \delta. \quad (5)$$

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

Для получения среднемесячных значений поглощенной радиации в формулу (3) нужно подставить среднемесячные значения приходящей радиации на ВГА и альbedo. Среднемесячные зональные значения альbedo имеются в атла-



сах, а для получения среднемесячных значений приходящего солнечного излучения в формулу Миланковича (4) для каждой широты  $\varphi$  можно подставить среднемесячные значения склонения Солнца  $\delta$  и среднемесячное расстояние Земли от Солнца  $r$ . Часовой угол  $t_s$  также рассчитывается по формуле (5), в которую для каждой широты  $\varphi$  нужно подставить среднемесячные значения склонения Солнца  $\delta$ . По этой методике рассчитывались среднемесячные величины поглощенной солнечной радиации.

В работе была рассчитана приходящая солнечная радиация двумя методами: 1) по формуле Миланковича, подставляя в формулу значения широты 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 своих дальнейших расчетах будем использовать данные, рассчитанные по средним значениям широты.

Кривые среднемесячной приходящей радиации для месяцев март и сентябрь симметричны относительно экватора, с минимумом у полюсов и максимумом на экваторе (рис. 7). Однако в летних полушариях максимальные значения приходятся не на экватор, а на полюса. Это объясняется тем,

что, несмотря на небольшую высоту Солнца в высоких широтах, продолжительность светового дня летом (июнь или декабрь) равна 24 часам, наблюдается полярный день. Поэтому среднесуточные и среднемесячные значения приходящей солнечной радиации на полюсе в данный период будут выше, чем на экваторе.

Для дальнейшей оценки составляющих РБЗ были построены графики широтного распределения среднемесячных значений поглощенной радиации для 1976, 1977, 1986, 1987 гг. по данным, рассчитанным по средним значениям широты. В качестве примера приведен график поглощенной радиации для 1987 г. (рис. 8).

Кривые поглощенной солнечной радиации для марта и сентября, как и теоретически рассчитанные, практически симметричны относительно экватора, с максимумом у экватора и минимумами у полюсов. В полном соответствии с широтным ходом альbedo (см. рис. 1 и 2) теперь в Южном полушарии значения марта выше значений сентября, а в Северном полушарии, наоборот, значения сентября выше значений марта. Аналогично, кривые поглощенной радиации отражают перемещения облачности ВЗК в диапазоне  $0^\circ \dots +15^\circ$ . Интересно, что во все годы абсолютный максимум поглощенной радиации отмечается в декабре месяце на широтах  $-20^\circ \dots -40^\circ$ , где он достигает  $410\text{--}420 \text{ Вт/м}^2$  в 1976–77 гг. и  $370\text{--}380 \text{ Вт/м}^2$  в 1986–87 гг. Аналогичный более слабый максимум в июне в средних

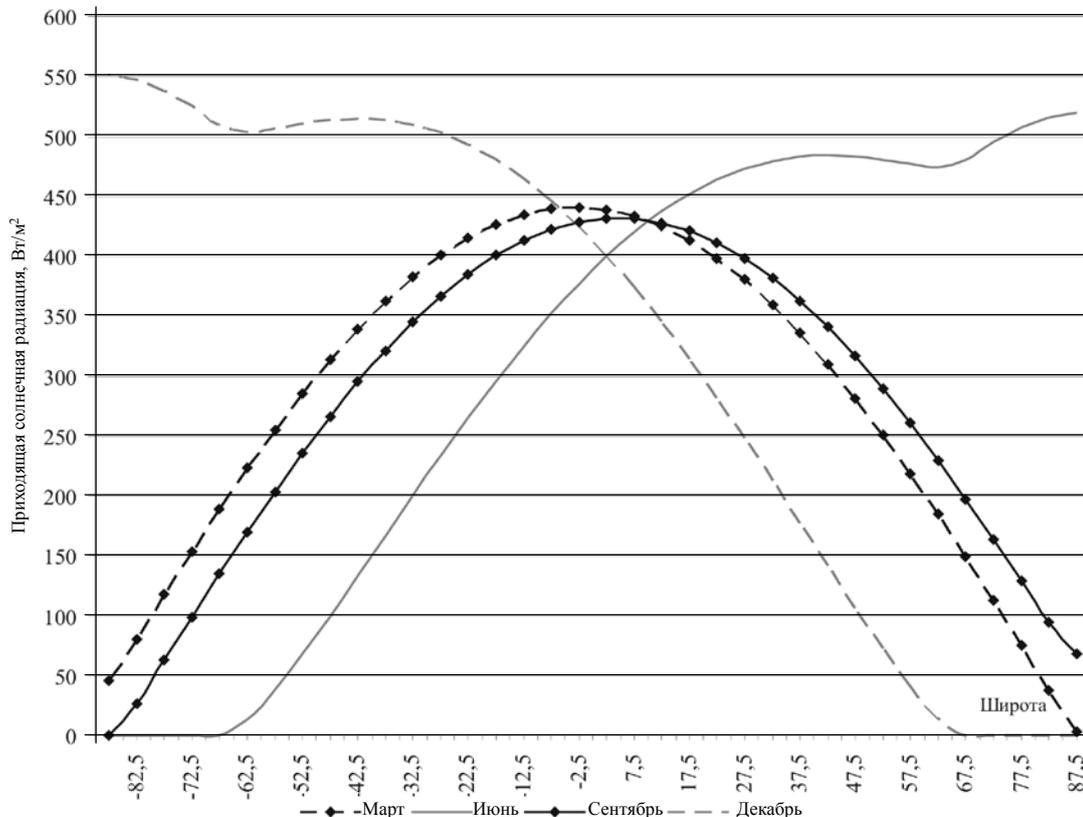


Рис. 7. Кривые распределения среднемесячной приходящей солнечной радиации

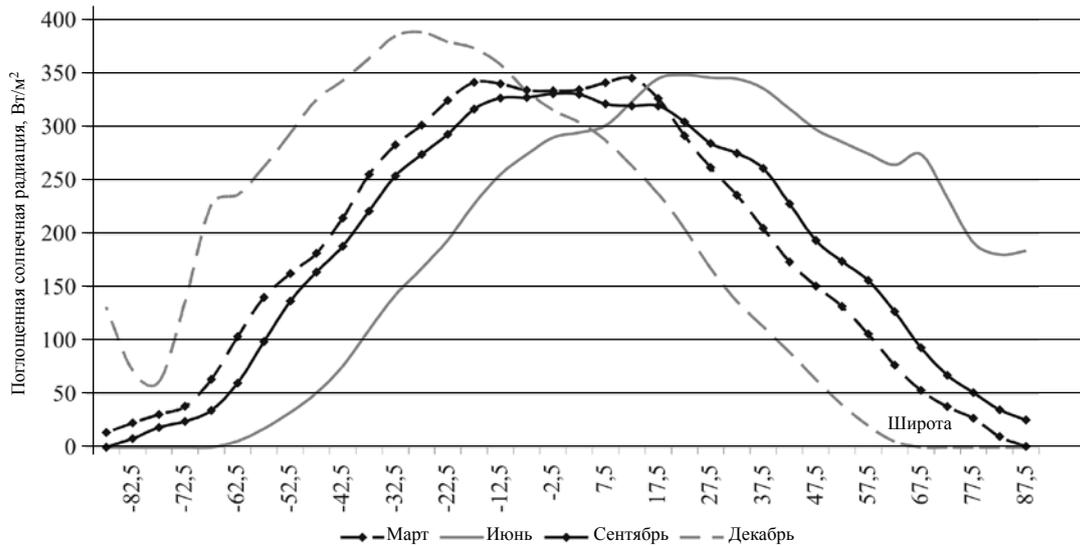


Рис. 8. Кривые распределения среднемесячной поглощенной солнечной радиации за 1987 г.

широтах  $+15^{\circ} \dots +35^{\circ}$  не превышает  $370 \text{ Вт/м}^2$  в 1976–77 гг. и  $350 \text{ Вт/м}^2$  в 1987 г.

Иными словами, прослеживается та же разница между показаниями от двух ИСЗ. Только теперь данные ряды от «Nimbus-6» больше, чем от «Nimbus-7», что и должно быть из-за различия в величинах альбедо. Минимум поглощенной солнечной радиации приходится на околополярные широты, где значение альбедо максимально.

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 альбедо. Используя те же значения среднемесячных величин зональных альбедо, можно записать следующие очевидные соотношения:

$$Q_{\text{ГЛ}} = \frac{1}{4\pi} \sum_{\theta_i=0^{\circ}}^{\theta_i=175^{\circ}} \omega_i E_i (1 - \alpha_i) \text{ — для глобального}$$

значения поглощенной радиации,

$$Q_{\text{NГЛ}} = \frac{1}{2\pi} \sum_{\theta_i=0^{\circ}}^{\theta_i=85^{\circ}} \omega_i E_i (1 - \alpha_i) \text{ — для Северного}$$

полушария,

$$Q_{\text{SГЛ}} = \frac{1}{2\pi} \sum_{\theta_i=90^{\circ}}^{\theta_i=175^{\circ}} \omega_i E_i (1 - \alpha_i) \text{ — для Южного}$$

полушария.

Здесь обозначения те же, что и в (2), а  $E_i$  – зональные величины приходящей радиации. Результаты расчетов были сведены в итоговую

таблицу. На основании этой таблицы были построены соответствующие графики (рис. 9), на которых показан внутригодовой ход глобальных значений поглощенной радиации, а также отдельно для Северного и Южного полушарий. В качестве примера взят 1987 год.

Глобальное значение поглощенной радиации в течение года меняется не очень сильно, что видно из рис. 9. 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 (июнь-июль), а максимум – на летние (декабрь-январь). Причем в Южном полушарии значение максимума больше, чем в Северном полушарии, а минимума меньше.

#### Уходящая длинноволновая радиация и ее вариации

Атласы УДР за 1979–1984 гг. [9] и 1985–1987 гг. [10] содержат карты глобального распределения УДР и таблицы сферических, гармонических коэффициентов на каждый месяц, кроме мая 1986 г. и октября, декабря 1987 г. В таблицах в нулевом столбце нулевой член дает среднеглобальные среднемесячные значения УДР ( $\text{Вт/м}^2$ ), 1-й – разность среднеполушарных значений УДР ( $\text{Вт/м}^2$ ), а 2-й – градиент экватор – полюс ( $\text{Вт/м}^2$ ).

Непосредственно по среднеглобальным среднемесячным значениям УДР были построены графики внутригодовой вариации УДР (рис. 10). Данные приведены через год.

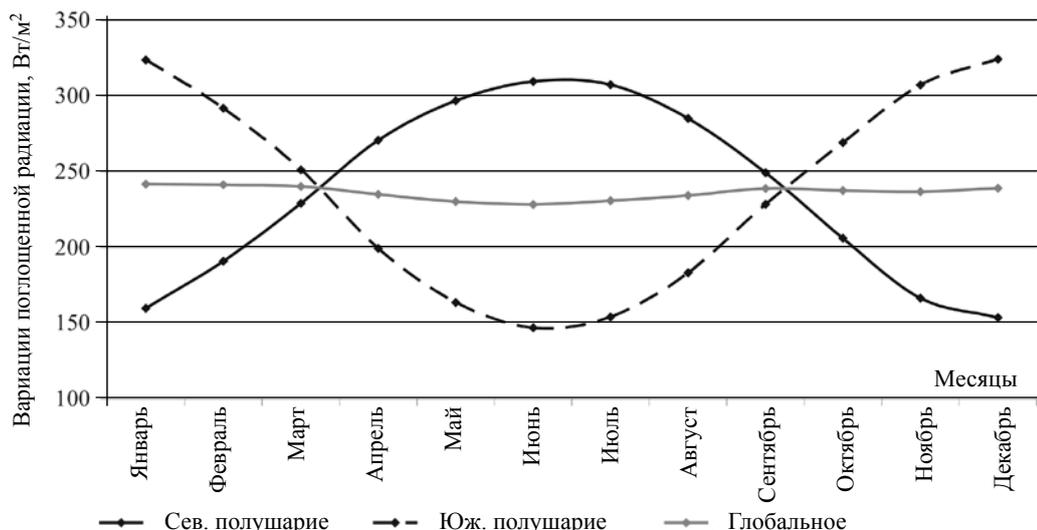


Рис. 9. Графики внутригодового хода среднемесячной поглощенной радиации за 1987 г.

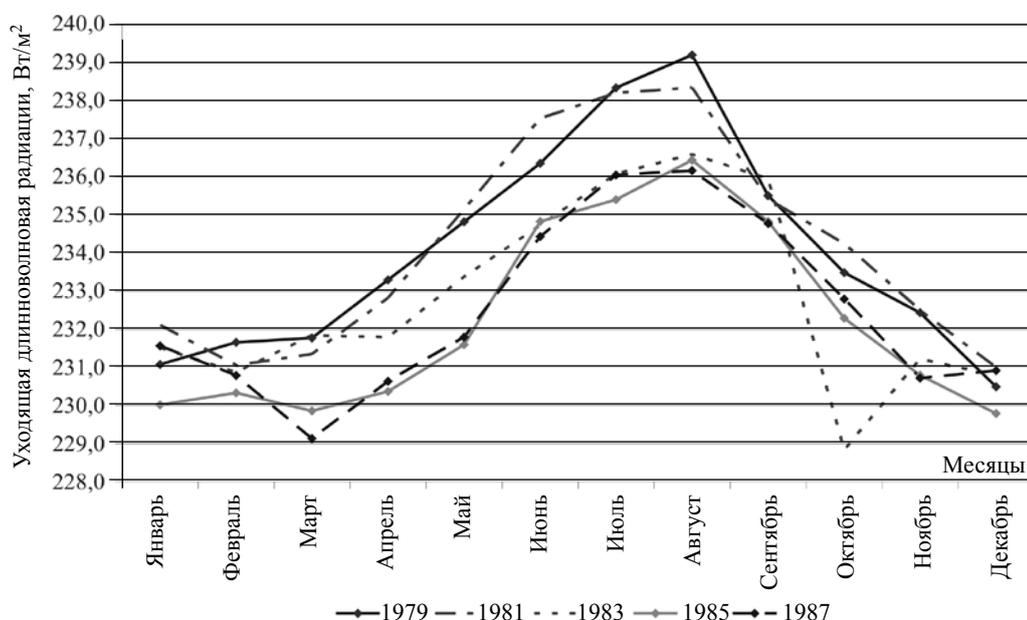


Рис. 10. Графики внутригодовой вариации УДР за 1979–1987 гг.

Из графиков (см. рис. 10) видно, что в холодное полугодие (ноябрь, декабрь, январь, февраль, март) 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.

Необычный ход УДР в 1983 г., возможно, объясняется развитием именно в этом году весьма масштабного явления Эль-Ниньо, что авторы атласов специально отмечали в тексте пояснений к ним.

Стоит отметить, что на этих графиках (см. рис. 10) вначале прослеживается тенденция к

уменьшению количества УДР (1979–83 гг.). Затем эта тенденция сошла на нет. Заметен также значительный разброс данных в феврале-марте месяцах.

Для того чтобы проследить межгодовую вариацию среднеглобальных значений УДР, были найдены средние годовые значения УДР за весь период наблюдений. Максимум среднеглобального УДР отмечается в 1980 г. со значением 234,53 Вт/м<sup>2</sup>, затем значения плавно снижаются до минимума 232,21 Вт/м<sup>2</sup> в 1985 г. В 1986 и 1987 гг. происходит незначительный рост УДР до значения 232,8 Вт/м<sup>2</sup>.

По имеющимся данным в атласах можно проследить внутригодовой ход разности среднеполушарных значений УДР (СП-ЮП). Максимальная



разность УДР между полушариями достигает  $+15,58 \text{ Вт/м}^2$  в июле 1979 г. (лето в Северном полушарии) и минимальная разность УДР – около  $10 \text{ Вт/м}^2$  в январе 1979–1982 гг. (лето в Южном полушарии). Знак минус означает, что в указанный период УДР ЮП превосходит УДР СП.

Среднегодовые величины разности среднеполушарных значений УДР за весь период 1978–1987 гг. испытывают незначительные вариации в пределах всего около  $2 \text{ Вт/м}^2$ , оставаясь все время положительными. Это говорит о том, что среднегодовые среднеглобальные величины УДР СП всегда больше, чем у ЮП.

Одной из важных 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 и о разности среднемесячных полушарных значений (УДР Северного минус УДР Южного полушарий). Мы применили следующую методику. Напишем формулу сохранения энергии:

$$4\pi R_E^2 L_{CP} = 2\pi R_E^2 L_N + 2\pi R_E^2 L_S,$$

где  $R_E$  – радиус Земли;  $L_{CP}$  – среднемесячное глобальное значение УДР;  $L_N$  – среднемесячное значение УДР Северного полушария;  $L_S$  – среднемесячное значение УДР Южного полушария. Тогда

$$2L_{CP} = L_N + L_S. \quad (6)$$

Обозначим через  $\Delta L$  разность УДР Северного и Южного полушарий, имеющуюся в атласах:

$$\Delta L = L_N - L_S. \quad (7)$$

Из уравнений (6) и (7) получаем

$$L_N = 2L_{CP} - L_S \text{ и } L_N = \Delta L + L_S.$$

Отсюда выразим  $L_S$ :  $L_S = L_{CP} - \frac{\Delta L}{2}$ .

По этим формулам рассчитываются значения УДР для Северного и Южного полушарий. По полученным значениям УДР были построены графики изменений полушарных значений УДР (рис. 11). Данные внутригодовых вариаций через год приведены на рис. 11, что не меняет выводов.

Анализ рис. 11 позволяет сделать ряд заключений:

- амплитуда изменений УДР в СП значительно больше, чем ЮП. В Северном она достигает  $16\text{--}17 \text{ Вт/м}^2$ , а в Южном – около  $6 \text{ Вт/м}^2$ . Очевидно, это следствие различия в поверхностях полушарий. На материках СП большую роль играют наступление и сход снежного покрова, чего нет в ЮП. Поверхность суши быстрее и сильнее прогревается, чем океан;

- отчетливо видно, что максимум УДР в СП приходится не на июнь, а на июль-август месяцы. Этот сдвиг почти в точности отражает поведение глобального альбеда СП (см. рис. 4 и 5), уменьшение которого в СП продолжается до августа месяца. А уменьшение альбеда приводит к росту поглощенной радиации и, соответственно, к росту УДР;

- так же отчетливо 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.

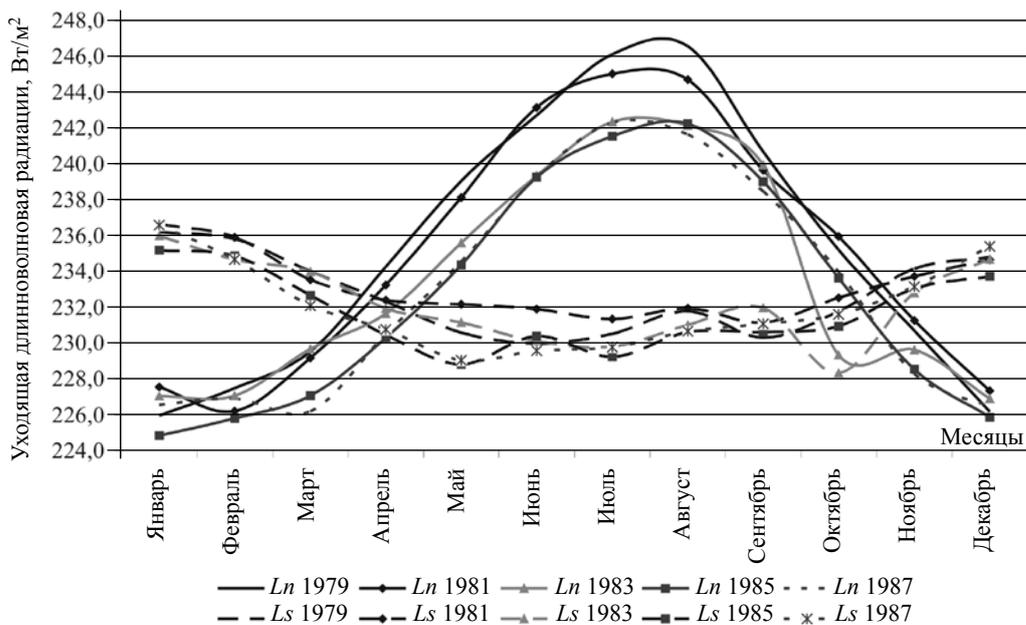


Рис. 11. Графики изменений полушарных значений УДР.



Таким образом, отмеченная ранее тенденция к снижению глобального значения УДР вызывается изменениями в СП;

– 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 одновременно.

#### Радиационный баланс Земли по материалам атласов

После завершения всех изложенных выше исследований можно оценить выполнение условия равенства нулю среднеглобального среднего годового радиационного баланса Земли на ВГА. К сожалению, выбор данных весьма ограничен. Для спутника «Nimbus-6» есть данные об альbedo, по которым можно рассчитать поглощенную радиацию, но нет данных об УДР. Для ИСЗ «Nimbus-7» также есть данные об альbedo, но данные об УДР имеются за другой период. Есть всего два года, где имеются парные данные: 1986 и 1987 годы. 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 точностью менее 0,1%. Поэтому можно их использовать. С такими замечаниями результаты выглядят следующим образом.

Среднегодовое значение поглощенной радиации методом «свертки» (с формулой Миланковича) получается больше, чем методом радиационного воздействия на  $7 \text{ Вт/м}^2$ . В 1987 г. УДР по данным атласа в среднем за год составляет  $232,48 \text{ Вт/м}^2$ , а рассчитанное значение методом «свертки» поглощенной радиации –  $236,2 \text{ Вт/м}^2$ . Разница всего 1,5%. 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. УДР с течением времени изменялась незначительно. Но при любой возможной экстраполяции на 1975–77 гг. УДР оказывалась меньше поглощенной радиации на 6–8%. По-видимому, это следствие отмеченного ранее различия в альbedo по данным «Nimbus-6» (меньше на 5 единиц, чем у «Nimbus-7»).

#### Библиографический список

1. Склярков Ю.А., Бричков Ю.И., Воробьев В.А. и др. Аэростатные измерения уходящей коротковолновой радиации // Исследование Земли из космоса. 1994. № 1. С. 11–20.
2. Склярков Ю.А., Бричков Ю.И., Воробьев В.А., Котума А.И. Измерения уходящего коротковолнового излучения и альbedo радиометром ИКОР с ИСЗ «Метеор-3» № 7 // Там же. 1999. № 2. С. 15–26.
3. Семенова Н.В. Уходящая коротковолновая радиация и альbedo на верхней границе атмосферы по наблюдениям с гелиосинхронного ИСЗ «Ресурс-01» № 4: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2003. 27 с.
4. Склярков Ю.А., Котума А.И., Семенова Н.В. и др. О построении карт глобального распределения альbedo по наблюдениям радиометра ИКОР с гелиосинхронного ИСЗ «Ресурс-01» № 4 // Исследование Земли из космоса. 2003. № 3. С. 14–21.
5. Склярков Ю.А., Бричков Ю.И., Фомина Н.В. и др. Определение среднесуточных величин альbedo с использованием спутниковых направленных моделей // Там же. 2005. № 3. С. 13–21.
6. Склярков Ю.А., Бричков Ю.И., Фомина Н.В. и др. Оценка наблюдаемости земной поверхности для надирных радиометров с различных ИСЗ // Там же. 2006. № 2, С. 1–8.
7. Smith G.L., Rutan D., Bess T.D. Atlas of albedo and absorbed solar radiation derived from Nimbus 6 Earth radiation budget data set – July 1975 to May 1978. NASA Ref. Publ. – 1230. Washington, 1990. 86 p.
8. Smith G.L., Rutan D., Bess T.D. Atlas of albedo and absorbed solar radiation derived from Nimbus 7 Earth radiation budget data set – November 1985 to October 1987. NASA Ref. Publ. – 1281. Washington, 1992. 55 p.
9. Bess T.D., Smith G.L. Atlas of wide-field-of-view outgoing longwave radiation derived from Nimbus 7 Earth radiation budget data set – November 1978 to October 1985. NASA Ref. Publ. – 1186. Aug. Washington, 1987. 174 p.
10. Bess T.D., Smith G.L. Atlas of wide-field-of-view outgoing longwave radiation derived from Nimbus 7 Earth radiation budget data set – November 1985 to October 1987. NASA Ref. Publ. 1261. June. Washington, 1991. 52 p.
11. Suttles J.T., Green R.N., Minnis P. et al. Angular radiation models for Earth-atmosphere system. NASA Ref. Publ. – 1184. Washington, 1988. 145 p.
12. Склярков Ю.А. Радиационные воздействия на климатическую систему и их роль в формировании климата // Современные глобальные и региональные изменения геосистем: Материалы Всерос. науч. конф., посвященной 200-летию Казанского университета. Казань, 2004. С. 381–383.