

Д.М. Кабанов, С.М. Сакерин

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОТОКОВ СУММАРНОЙ И СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРЯМОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В РАЙОНЕ г. ТОМСКА ВЕСНОЙ 1993 г.

Приведены результаты исследования радиационного режима атмосферы в весенний период 1993 г. В сопоставлении с многолетними данными актинометрической сети анализируется характер изменчивости часовых, дневных и месячных сумм суммарной радиации. Рассмотрены особенности вариаций спектральной прямой радиации для ряда длин волн видимой и инфракрасной области спектра. Представлены оценки взаимосвязей потоков приходящей радиации с влажностью и прозрачностью атмосферы.

Характер изменчивости актинометрических параметров (суммарная, прямая, рассеянная радиация) определяется, как известно [1, 2], астрономическими, географическими факторами и состоянием атмосферы – облачностью, аэрозольным замутнением, влажностью. По данным актинометрической сети средние величины потоков и диапазон вариаций имеют в основном широтную зависимость. В то же время природно-антропогенная специфика конкретных районов и особенности атмосферной циркуляции могут оказывать заметное воздействие на характер радиационного режима и приводить к отличиям от усредненных данных.

О величине пространственной изменчивости потоков радиации можно судить по оценкам коэффициента корреляции r для различных расстояний между актинометрическими станциями [1]. Так, в условиях равнины на расстояниях до 300 км величина r для суточных сумм суммарной радиации превышает 0,5, на расстояниях 30 – 50 км – становится не менее 0,8–0,9, а на дистанциях ≈ 1000 км – значение r практически равно нулю. Аналогичные оценки получены и для месячных сумм радиации, несмотря на то, что для них характерна меньшая изменчивость.

С точки зрения рациональных расстояний между пунктами актинометрической сети, составляющих около 300 км для равнины [1], Западно-сибирский регион отличается недостаточным количеством действующих станций. Для района г. Томска большинство станций находятся на расстояниях более 470 км [Новосибирск (Огурцово) – 200, Енисейск – 470, Хакасская – 490, Благовещенка – 520, Александровское – 600, Омск – 740 км], поэтому интерполяция актинометрических данных может приводить к большим погрешностям при описании радиационного режима территории.

С учетом этого обстоятельства в рамках программы <Климато-экологический мониторинг Сибири> [3] Институтом оптики атмосферы были начаты исследования региональных и местных особенностей изменчивости компонент солнечной радиации в районе г. Томска. Первый цикл измерений был проведен в весенне-летний период 1993 г. (с 3 апреля по 15 июня).

С помощью пиранометра М-80м измерялись мгновенные значения суммарной радиации Q , рассчитывались часовые $\sum Q_{ч}$, дневные $\sum Q_{д}$ и месячные $\sum Q_{м}$ суммы. Непрерывная регистрация потоков Q осуществлялась на самописце ЛКС4-003.

Спектральная прямая солнечная радиация (на перпендикулярную поверхность) S_{λ} измерялась многоволновым солнечным фотометром АМСФ [4] в диапазоне спектра 0,447–12,1 мкм (14 спектральных участков) со средней разрешающей способностью 10^{-2} . Расчет абсолютных значений S_{λ} проводился на основе <долгого метода Бугера> с использованием внеатмосферных значений спектральной солнечной постоянной [5].

Во избежание затенений приборов от строений и деревьев измерительная площадка была оборудована на крыше здания. Координаты точки наблюдения составляли $56,47^{\circ}$ с.ш. и $85,03^{\circ}$ в.д.

За измерительный период было получено более 60 дневных реализаций суммарной радиации Q и более 900 спектров прямой радиации S_λ для 40 дней.

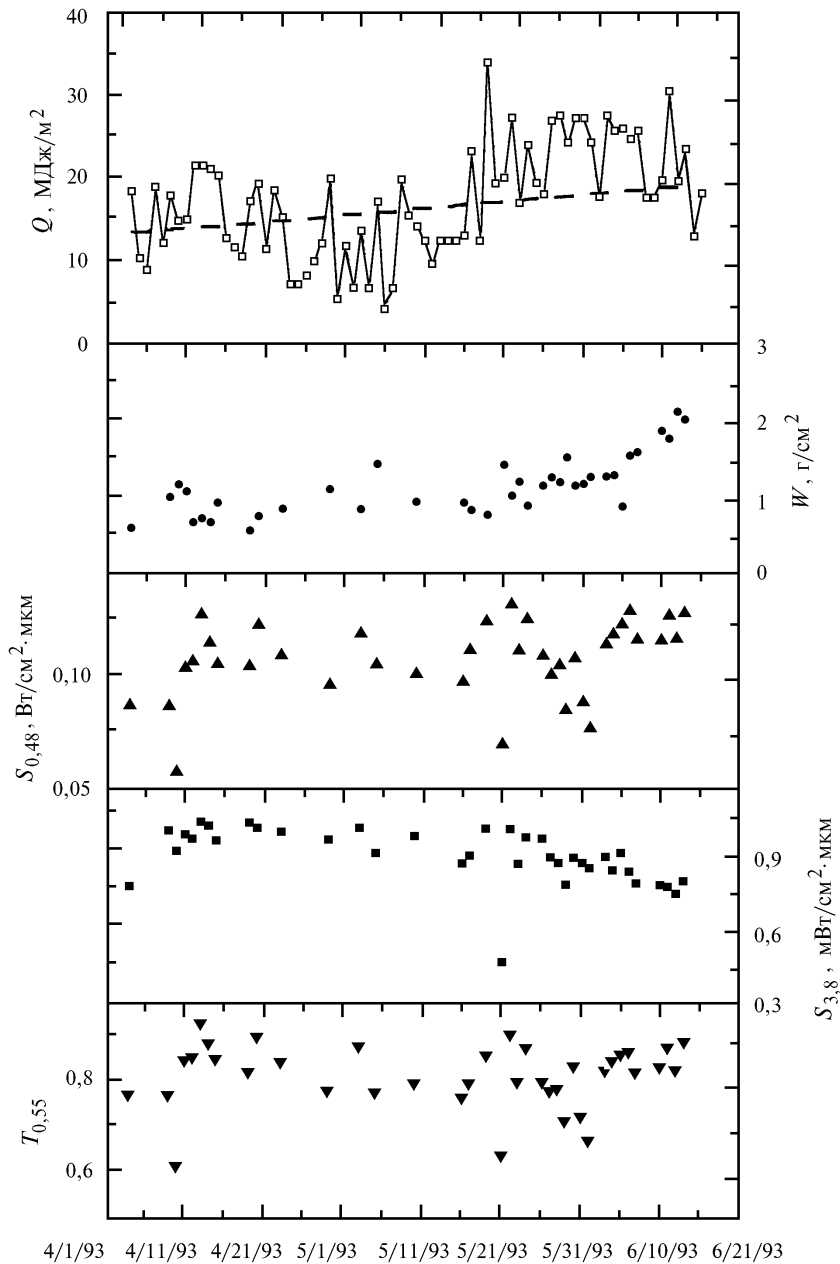


Рис. 1. Изменчивость ΣQ_d и средних (с 9 до 15 ч) значений потоков $S_{0,48}$, $S_{3,8}$, влагосодержания W и прозрачности атмосферы $T_{0,55}$ в г. Томске за исследованный период (штриховой линией показан сезонный тренд по многолетним данным для района г. Новосибирска [6])

Суммарная радиация

Общий характер изменения дневных сумм радиации показан на рис. 1. Влияние астрономического фактора в исследованный период (увеличение высоты Солнца и продолжительности светового дня) должно проявляться в монотонном росте дневных сумм радиации. В реальности, начиная с последней декады апреля, наблюдалось снижение уровня радиации с последующим ее резким увеличением. Анализ атмосферных условий позволил выявить сле-

дующие факторы, суммарное воздействие которых привело к задержке притока радиации и характерному переходу в середине мая от весны к лету:

а) повышенная облачность и осадки с конца апреля до середины мая вследствие действия неустойчивых воздушных масс (в том числе воздействие местного похолодания во время ледохода рек обского бассейна);

б) повышенное атмосферное замутнение из-за конвекции аэрозоля при сходе снежного покрова и оголении почвы, а также под влиянием изменения фенологической фазы (образование пыльцы растений).

В гистограммах повторяемости значений ΣQ_d (рис. 2) присутствуют две моды, соответствующие периодам весны (точнее, ее окончания) и лета, что позволило выделить два подмассива и проанализировать их отдельно.

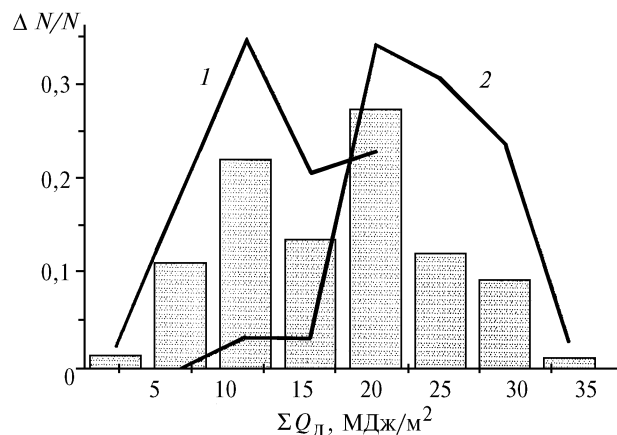


Рис. 2. Гистограммы повторяемости значений ΣQ_d (для общего массива данных – столбики, для весны (1) и лета (2) – линии)

Количественные характеристики происшедших изменений величин ΣQ_d отражаются данными табл. 1. При переходе от весны к лету (периоды I и II в таблице) увеличение среднего уровня радиации составило более 70%. Одновременно стабилизировалась межсуточная изменчивость притока радиации, и величина коэффициента вариации ($\sigma / \Sigma Q$) уменьшилась в 1,64 раза.

Ниже, в таблице приведены значения ΣQ_d для различных месяцев. Здесь же для сравнения указаны средние данные для ст. Огурцово (здесь и далее проведен пересчет данных [6] из [кал / см²] в [МДж / м²]). Из сопоставления с многолетними данными следует наличие дефицита притока радиации в первые два месяца и превышение среднего уровня в июне. Относительно межсуточной изменчивости (σ и $\sigma / \Sigma Q_d$) следует отметить неустойчивость радиационного режима в мае и в 1,5 – 2 раза меньшие вариации для апреля и июня.

Таблица 1

Статистические характеристики дневных сумм радиации ΣQ_d (МДж/м²) для различных периодов наблюдений

Сроки наблюдений	$\overline{\Sigma Q_d}$	σ	$\sigma / \overline{\Sigma Q_d}$	Min	Max	N
I 4.04–16.05.93	13,48	4,82	0,36	4,31	21,61	43
II 17.05–15.06.93	23,07	5,08	0,22	12,73	34,09	30
Апрель Томск, 1993	14,35	4,75	0,33	5,34	21,61	30
	п. Огурцово [6]	14,86	–	–	–	–
Май Томск, 1993	17,59	7,56	0,43	4,32	34,09	31
	п. Огурцово [6]	19,51	–	–	–	–
Июнь Томск, 1993	22,59	4,83	0,21	13,42	31,01	15
	п. Огурцово [6]	20,85	–	–	–	–

В месячных суммах радиации ΣQ_m (табл. 2) резкие изменения не проявились, так как вышеуказанный скачок уровня радиации произошел в середине месяца. Для сравнения с резуль-

татами, полученными в Томске, в табл. 2 приведены многолетние данные по трем ближайшим актинометрическим станциям [2, 6]. Сопоставление результатов позволяет заключить, что для апреля значение ΣQ_M было несколько ниже средних многолетних для всех станций региона. В мае месячная сумма радиации находилась на уровне средних значений, а в первой половине июня полумесячная сумма достигла максимальных значений, зарегистрированных в регионе.

Анализ диаграмм временной изменчивости часовых сумм $\Sigma Q_{\text{ч}}$ показал, что в среднем наблюдается практически симметричный относительно полудня суточный ход. В качестве примера в табл. 3 приведена статистика $\Sigma Q_{\text{ч}}$ для трех сроков наблюдений (9, 12 и 15 ч) за весь измерительный период.

Таблица 2

Месячные суммы суммарной радиации ΣQ_M , МДж/м²

Район	Среднее (min–max)		
	Апрель	Май	1/2 июня
Томск, 1993	430,5	545,4	338,9
Александровское [6]	443,8	556,8	309,8*
	(393,6–506,6)	(515,0–615,5)	(263,7–349,6)
Колпашево [6]	477,3	523,3	288,9*
	(431,2–573,6)	(456,4–623,8)	(286,8–334,9)
Новосибирск [6]	448,0	577,8	320,3*
	(376,8–519,2)	(468,9–661,5)	(301,4–355,9)

* В качестве полумесячных сумм радиации использованы значения $0,5 \overline{SQ_M}$.

Таблица 3

Часовые суммы радиации $\Sigma Q_{\text{ч}}$ для всего периода наблюдений

Срок наблюдений, ч	$\overline{SQ_{\text{ч}}}$	σ	σ/\overline{Q}	min	max	N
9	1,71	0,62	0,36	0,59	2,69	52
12	2,21	0,78	0,35	0,23	3,69	53
15	1,63	0,63	0,39	0,24	2,65	52

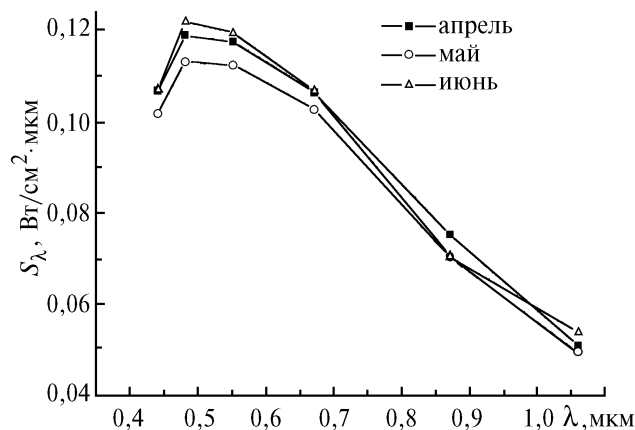


Рис. 3. Средний спектральный ход полуденных значений коротковолновой радиации S_{λ} для трех месяцев наблюдений

Спектральная прямая радиация

В отличие от более сложной взаимосвязи суммарной радиации с атмосферными условиями, прямая радиация непосредственно определяется прозрачностью атмосферы и варьирует с изменением влагосодержания и аэрозольного состава (см. рис. 1). Основное поступление прямой радиа-

ции осуществляется, как известно, в диапазоне спектра 0,3 – 4 мкм. Величину вклада различных S_{λ_i} можно оценить по статистическим данным, приведенным в табл. 4 и на рис. 3.

Полученные результаты показывают, что наибольшие абсолютные изменения S_{λ} происходят в видимом диапазоне спектра. По мере продвижения в инфракрасный диапазон и уменьшения влияния аэрозольного ослабления снижаются как абсолютные, так и относительные ($\sigma / \bar{S}_{\lambda}$) характеристики вариаций S_{λ} .

Воздействие атмосферного фактора в мае оказалось более сильным, чем ожидаемое увеличение прямой радиации за счет более высокого Солнца (майские значения S_{λ} ниже апрельских).

Таблица 4

Средние значения и коэффициенты вариаций радиации S_{λ} (0,447–1,06 мкм в мВт/см² · мкм, 3,8–12,1 мкм в мкВт/см² · мкм) в полдень для трех месяцев наблюдений

λ , мкм	Апрель		$\Delta \bar{S}$, %	Май		Июнь	
	\bar{S}_{λ}	V_s , %		\bar{S}_{λ}	V_s , %	\bar{S}_{λ}	V_s , %
0,447	106,7	11,5	-4,4	102,0	12,7	107,2	12,1
0,484	118,9	10,2	-5,0	113,0	13,1	121,9	11,6
0,552	117,7	9,4	-4,4	112,5	9,4	119,7	8,1
0,674	106,8	8,9	-3,4	103,2	8,1	107,2	5,7
0,869	76,1	5,9	-6,4	71,2	7,1	71,3	3,5
0,941	60,9	11,3	-13,0	53,0	13,9	50,8	11,3
1,061	51,7	5,4	-2,7	50,3	7,9	54,8	3,9
3,8	1011	2,4	-9,0	919,5	7,3	847,3	7,0
4,7	368,1	5,8	-11,1	327,3	14,2	281,9	13,5
8,1	49,4	5,7	-12,8	43,1	12,7	38,7	10,8
9,1	31,8	4,2	-9,7	28,7	9,1	26,3	11,2
9,47	25,0	8,0	-11,2	22,2	13,0	20,0	10,8
10,55	18,6	4,6	-11,3	16,5	12,4	14,1	14,2
12,1	10,8	3,4	-12,0	9,5	11,6	8,2	12,4

Влияние поглощения атмосферными газами (в основном H₂O) можно проследить по уменьшению значений S_{λ} в ИК-диапазоне от апреля к июню и по двукратному увеличению коэффициента вариаций $V_s = \sigma / \bar{S}_{\lambda}$ с переходом от окна прозрачности к полосе поглощения (см. данные для $\lambda_{H_2O} = 0,941$ мкм).

В отдельном столбце табл. 4 приведена величина относительного изменения прямой радиации от апреля к маю ($\Delta / \bar{S}_{\lambda}$). Приведенные оценки $\Delta / \bar{S}_{\lambda}$ показывают, что в коротковолновом диапазоне спектра (до $\lambda = 1,06$ мкм) уменьшение радиации составило в среднем $\approx 4,5\%$, в длинноволновом 11%. По характеру изменения общего влагосодержания (см. W на рис. 1) можно сделать вывод, что уменьшение S_{λ} в ИК-диапазоне произошло из-за сезонного увеличения влажности атмосферы.

В дневной изменчивости S_{λ} (рис. 4), наряду с регулярной астрономической составляющей (повышение радиации к полудню), отразились особенности дневного хода прозрачности. Так, в дневном ходе S_{λ} в мае отчетливо проявилась асимметрия и пониженные значения радиации, кроме утренних часов. Такое поведение S_{λ} связано, как уже отмечалось, с таянием снежного покрова в утренние часы, усилением конвекции и повышением замутнения атмосферы из-за аэрозоля и влажности.

Количественные данные о характере дневной изменчивости S_{λ} приведены в табл. 6. Из полученных результатов следует, что для апреля и мая дисперсия колебаний радиации S_{λ} увеличивается от утра к вечеру, а в июне после полудня наблюдается ее снижение. Коэффициенты вариаций для первых двух месяцев до полудня практически не меняются, а затем наблюдается их увеличение. В июне все статистические параметры имеют симметричный дневной ход, причем σ_s и V_s в два раза меньше весенних значений, что свидетельствует о стабилизации атмосферных условий.

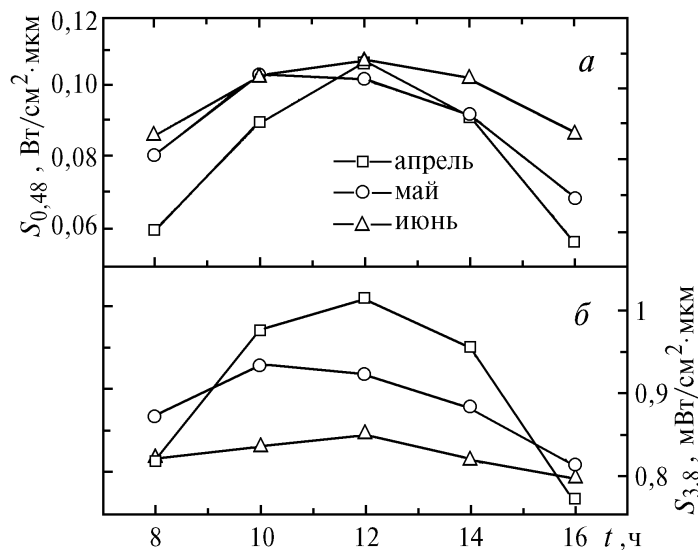


Рис. 4. Средний ход радиации $S_{0,48}$ (а) и $S_{3,8}$ (б)

Таблица 5

Статистика $S_{0,55}$ (мВт/см² · мкм) для различных сроков наблюдений

Сроки наблюдений, ч	\bar{S}	σ_s	σ_s/\bar{S}	S_{\min}	S_{\max}	N	
Апрель	10	10,4	0,96	0,093	9,07	12,49	9
	12	11,8	1,10	0,094	9,33	12,73	8
	14	10,7	1,11	0,104	8,78	12,04	7
Май	10	11,4	1,07	0,094	9,80	13,37	9
	12	11,3	1,06	0,094	9,44	12,93	11
	14	10,5	1,14	0,108	8,93	12,05	8
Июнь	10	12,0	0,57	0,048	7,70	12,75	9
	12	12,0	0,96	0,081	9,93	12,73	7
	14	11,6	0,82	0,071	9,93	12,54	7

Учитывая большое влияние на радиационные компоненты (наряду с облачностью) влагосодержания и аэрозольной прозрачности атмосферы, представляет интерес рассмотреть степень взаимосвязи указанных величин (см. рис. 1). С этой целью были рассчитаны коэффициенты взаимной корреляции для средних значений потоков радиации Q , $S_{0,48}$, $S_{3,8}$, общего влагосодержания W (спектроскопический метод) и прозрачности атмосферы $T_{0,55}$ для середины дня – с 9 до 15 ч местного солнечного времени (табл. 6).

Как и следовало ожидать, максимальные значения корреляции свойственны прямой радиации $S_{0,48}$ с аэрозольной компонентой прозрачности $T_{0,55}$, а также $S_{3,8}$ с влагосодержанием W и $T_{0,55}$. Причем отрицательная корреляция $r(S_{3,8} / W)$ тоже достаточно очевидна из-за наличия обратной зависимости пропускания атмосферы (и, следовательно, приходящей радиации) от влагосодержания. Взаимосвязь потоков $S_{0,48}$ с Q и $S_{3,8}$ оказалась на уровне порога значимости, что обусловлено в каждом случае противоположным действием (на Q и $S_{3,8}$) различных факторов. С одной стороны, уменьшение аэрозольного замутнения приводит к очевидному увеличению как $S_{0,48}$, так и потоков Q и $S_{3,8}$. С другой стороны, на радиацию $S_{3,8}$ большее воздействие оказывает содержание водяного пара, а на Q велико влияние облачности, которые напрямую не связаны с аэрозольной прозрачностью атмосферы.

**Коэффициенты взаимной корреляции компонент радиации
с влажностью и прозрачностью атмосферы**

	Q	W	$S_{0,48}$	$S_{3,8}$	$T_{0,55}$
Q	–	0,21*	0,32*	-0,23*	0,21*
W	–	–	0,10**	-0,63**	0,10**
$S_{0,48}$	–	–	–	0,31**	0,94**
$S_{3,8}$	–	–	–	–	0,46**
$T_{0,55}$	–	–	–	–	–

Критическое значение коэффициентов корреляции r (на уровне значимости 0,95):

* $r = 0,34$; ** $r = 0,32$.

Таким образом, полученные данные об изменчивости потоков Q и S_λ характеризуют особенности радиационного режима, которые были связаны как с общим сезонным переходом, так и со специфической циркуляционных процессов в районе г. Томска в весенний период 1993 г.

В заключение следует отметить, что рассмотренные результаты и выводы в определенной степени носят предварительный характер, так как охватывают только один измерительный сезон.

1. Пивоварова З. И. Радиационные характеристики климата в СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 336 с.
2. Русин Н. П. Прикладная актинометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 232 с.
3. Кабанов М. В. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т.6. N2. С. 121 – 129.
4. Кабанов Д. М., Сакерин С. М., Сутормин А. М., Турчинович С. А. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т.6. N4. С. 444 – 451.
5. Прецизионные радиационные измерения в метеорологии // Перевод с англ. под ред. К.Я. Кондратьева, Л.Б. Красильщикова. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 272 с.
6. Справочник по климату СССР. Вып. 20. Ч.1. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 76 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
28 сентября 1994 г.

D. M. Kabanov, S. M. Sakerin. Variability of Summarized and Spectral Direct Solar Radiation Flows in Tomsk Region in Springtime of 1993.

The results of investigation of the atmosphere radiation regime in spring of 1993 are presented. The behaviour of variability of hourly, diurnal, and monthly sums of the summarized radiation are analysed in comparison with actinometric data for many years. The peculiarities of the spectral direct radiation variation for a number of wavelengths of visible and IR spectral ranges are considered. The estimates are presented of interconnection between incoming radiation flows and atmospheric moisture content and transparency.