

Б.Д. Белан, Т.К. Складнева

## Результаты измерения суммарной солнечной радиации в районе Томска

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 2.12.99 г.

Представлены результаты мониторинга суммарной солнечной радиации, проводимого на TOR-станции ИОА СО РАН с апреля 1995 г. по настоящее время. Результаты оценки радиационного режима г. Томска верифицированы путем сопоставления с данными актинометрической ст. «Огурцово». Установлено, что за рассматриваемый период в районе Томска наблюдался достаточно устойчивый радиационный режим с максимальным поступлением суммарной солнечной радиации в июле. Величина и диапазон колебаний месячных сумм радиации изменялись в зависимости от сезона. В зимний период коэффициент вариации месячных сумм менялся в пределах 5–9%, а в переходный период от 2 до 24%. Исследована величина прихода суммарной радиации в зависимости от типа воздушных масс и синоптических условий. Отмечено, что наблюдается сложная зависимость прихода суммарной солнечной радиации в течение года, обусловленная типом воздушных масс, которая отражает особенности общей циркуляции атмосферы над регионом. Величина суточной суммы суммарной солнечной радиации при антициклоне в среднем выше в 1,8 раза, чем при циклоне в течение всего года.

Исследование радиационного режима атмосферы, одной из характеристик которого является суммарная солнечная радиация, имеет важное значение для понимания физических процессов, происходящих в воздушной оболочке планеты. Эти процессы, определяющие энергетику системы «Земля–атмосфера», являются первоисточником всей жизнедеятельности на земном шаре. В свою очередь, атмосфера оказывает влияние на распространение в ней солнечного излучения. Поэтому изучение преобразования солнечной радиации в атмосфере требует количественной оценки для представления о радиационном режиме в целом.

В последние годы появился ряд публикаций, посвященных анализу многолетней изменчивости прихода солнечной радиации к поверхности Земли над территорией России и, в частности, Западной Сибири. Авторы работ [1, 2] на основе данных актинометрической сети СССР до 1990 гг. отмечают, что на территории Западной Сибири в общем наблюдаются уменьшение годовых сумм суммарной и прямой радиации и увеличение рассеянной. В то же время в отдельных районах региона наблюдаются свои особенности.

В Томске регулярных или сетевых измерений характеристик солнечной радиации не проводилось. Поэтому на базе автоматического поста (TOR-станция), созданного в ИОА СО РАН в 1992 г. и предназначенного для мониторинга газового и аэрозольного состава воздуха, метеовеличин и других геофизических величин [3], с апреля 1995 г. начаты систематические измерения радиационных характеристик: суммарной солнечной радиации  $Q$  и радиационного баланса  $B$ . Для этого применяются стандартные приборы: пиранометр М-115М и балансомер М-10М, которые согласуются с ЭВМ через специальные преобразователи. Измерения ведутся круглосуточно и ежечасно (1, 2, 3, ..., 24 ч). Сам цикл измерений продолжается 10 мин, в течение которых производится отсчет перечисленных параметров с частотой 1 Гц. Итоговый результат, фиксируемый ЭВМ, получается осреднением 600 разовых значений и расчетом

среднеквадратического отклонения по ним для каждой из измеряемых величин. Результат измерения интенсивности суммарной солнечной радиации и радиационного баланса записывается на жесткий магнитный диск.

Целью работы является оценка поступления суммарной солнечной радиации и ее изменчивости в районе Томска.

Для получения информации об изменении суммарной солнечной радиации за период измерений рассчитывались ежедневные суточные суммы, а также месячный и годовой приход суммарной солнечной радиации. Предварительно исходный массив данных выбраковывался, а имеющиеся в результате сбоя техники пробелы в сроках измерения восстанавливались путем аппроксимации значений в предыдущий и последующий сроки. В результате анализа данных получен средний годовой ход суммарной солнечной радиации за 1995–1999 гг. в районе г. Томска (рис. 1).

Из рисунка видно, что в годовом ходе наименьшая радиация отмечается в декабре. Начиная с марта, она резко возрастает, достигая наибольшего значения в июле. Следует отметить, что при достаточно классическом годовом ходе  $Q$  наблюдается и отклонение от него: средний приход суммарной радиации в июне оказался меньше, чем в мае. Поскольку имеем короткий ряд наблюдений, то необходимо определить ошибку расчета среднегодового прихода суммарной солнечной радиации и оценить значимость этого отклонения. По полученным данным, средне-годовой приход солнечной радиации за четырехлетний период составил 4134,68 МДж/м<sup>2</sup>, а среднеквадратическое отклонение равно 87,43 МДж/м<sup>2</sup>. При этом ошибка среднегодового  $Q$  равна 50,477 МДж/м<sup>2</sup>. Если задать ошибку равной 30 МДж/м<sup>2</sup> (ошибка многолетнего среднегодового  $Q$  с такой точностью при условии, что среднеквадратическое отклонение такое же, необходим период измерения 9–10 лет. Поэтому приводимые результаты характеризуют только рассматриваемый период, но не многолетние закономерности.

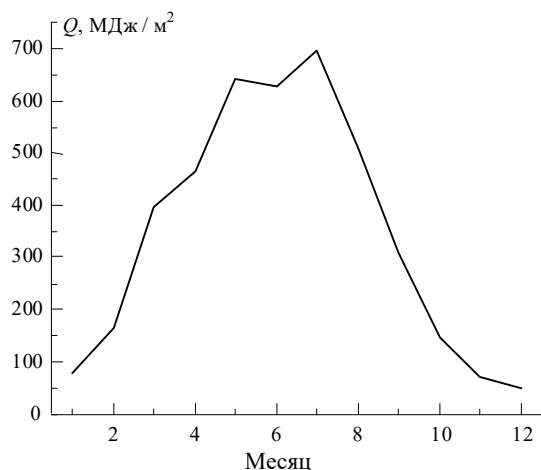


Рис. 1

Ввиду того что ранее измерений суммарной солнечной радиации в г. Томске не проводилось, представляет интерес сравнение полученных данных с многолетними наблюдениями на близлежащих станциях. В табл. 1 приведены среднемесячные суммы суммарной солнечной радиации, зарегистрированные в г. Томске, и среднемесячные  $Q$ , отмеченные на актинометрических станциях «Огурцово», расположенной в 150 км юго-западнее г. Томска, и «Александровское», находящейся в 600 км севернее, за период с 1959 по 1994 г. Эти станции выбраны не только из-за своей географической близости, но и потому, что, как отмечается в [4], на станциях «Александровское» и «Огурцово» за последний 36-летний период существенного тренда по параметру суммарной радиации не произошло. Из табл. 1 видно, что среднемесячные суммы суммарной радиации в районе Томска сравнимы с многолетними наблюдениями на станции «Огурцово». В то же время наблюдается смещение максимума месячной суммы с июня на июль для г. Томска, что отражает особенности циркуляции воздуха в этом районе.

Таблица 1

Среднемесячные суммы суммарной радиации  $Q$  (МДж/м<sup>2</sup>) на ст. «Александровское» и «Огурцово» (1959–1994 гг.) и в г. Томске (1995–1998 гг.)

Месяц	Ст. «Александровское»	Ст. «Огурцово»	г. Томск
I	36,43	81,03	78,96
II	112,05	169,28	165,10
III	299,92	350,83	401,10
IV	452,27	460,66	473,10
V	545,36	570,64	626,80
VI	598,80	646,97	634,00
VII	609,38	641,04	685,5
VIII	423,34	496,08	504,6
IX	235,28	313,92	298,50
X	110,69	165,28	146,20
XI	48,31	88,00	71,33
XII	19,56	57,35	49,38
Год	3491,39	4041,08	4128,98

Установлено [5], что месячный приход суммарной радиации более изменчив от года к году, чем годовая. Поэтому представляет интерес рассмотреть подробно межгодовую изменчивость. Из рис. 2 видно, что величина и диапазон колебаний месячных сумм радиации зависят от сезона. В зимний период (ноябрь–февраль) коэффициент вариации  $V$  месячных сумм менялся в пределах 5–9%, а минимальные ко-

лебания отмечены в декабре–январе. В летний период (июль–август)  $V = 9 \div 13\%$ . Минимальная месячная сумма  $Q$  зарегистрирована в июне 1995 г., а максимальная – в июле 1998 г. В переходный период (весна, осень) диапазон изменения месячных сумм более широкий –  $V = 2 \div 24\%$ . Наименьшие колебания месячной суммы наблюдались в мае ( $V = 2\%$ ), а наибольшие – в сентябре ( $V = 23,9\%$ ). Обращают на себя внимание такие месяцы, как апрель и июнь, своей неустойчивостью месячных сумм. Это несколько выше, чем по данным З.И. Пивоваровой и В.В. Стадник [5], которые показали, что на территории юга Западной Сибири в весенне-летний период коэффициент вариации суммарной солнечной радиации равен 10%, а в осенний период увеличивается в среднем до 15%. Возможно, здесь сказываются различия в длине ряда.

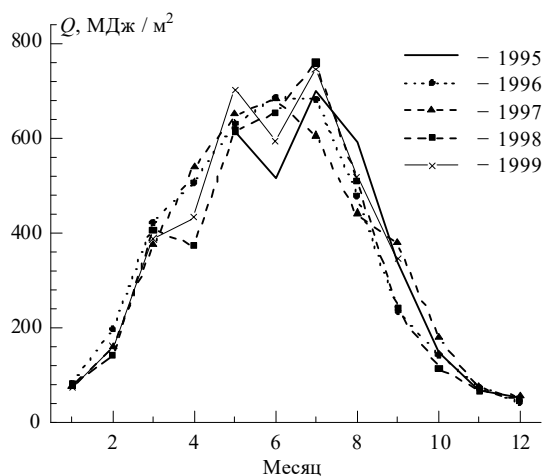


Рис. 2. Годовой ход суммарной солнечной радиации в районе г. Томска

Известно, что приход солнечной радиации к земной поверхности зависит от большого количества факторов, в том числе от прозрачности атмосферы, количества и формы облаков, формирование которых определяется синоптическими условиями. При определенной комбинации факторов могут создаваться условия, наименее благоприятные приходу солнечной радиации, и тогда отмечается уменьшение поступления солнечной радиации. Так, большое число циклонических ситуаций (32%) со сплошной облачностью (8–10 баллов) в апреле 1998 г. привело к аномально низкой месячной сумме 374,39 МДж/м<sup>2</sup>, не свойственной для этого времени года.

Следует отметить, что в Томске июнь, как правило, характеризуется неустойчивой синоптической ситуацией, что нашло свое отражение в уменьшении месячных сумм суммарной радиации по сравнению с соседними к нам регионами. Так, в июне 1995 г. отмечено 16,9% случаев, когда преобладают циклоны со сплошной облачностью нижнего яруса, и 16,8% антициклонических ситуаций. При этом большая часть антициклонических ситуаций также сопровождалась высокой повторяемостью облачности нижнего яруса и осадками, что и привело к уменьшению месячной суммы  $Q$  на 17,5% от средней. В то же время преобладание антициклонов с высокой прозрачностью атмосферы способствовало максимальному приходу радиации в июле (1998, 1999 гг.).

В целом в рассматриваемый период в районе г. Томска наблюдался достаточно устойчивый радиационный режим. Из табл. 2 видно, что годовая сумма  $Q$  практически не меня-

лась от года к году и коэффициент вариации годовых сумм суммарной радиации равен 2%, тогда как для юга Западной Сибири в [5] получена характерная величина  $V = 4-5\%$ . На ст. «Огурцово» вариации годовых сумм составили 5,3%, а на ст. «Александровское» – 4,5% с 1959 по 1994 г. Возможно, что столь низкое значение  $V$  в Томске обусловлено коротким рядом наблюдения и тем, что период измерений попал в фазу низких значений числа Вольфа (рис. 3).

Таблица 2

Годовое поступление суммарной солнечной радиации в районе г. Томска

Год	1995	1996	1997	1998	Среднее
$Q$ , МДж/м <sup>2</sup>	4143,14	4184,80	4201,91	4008,87	4134,68

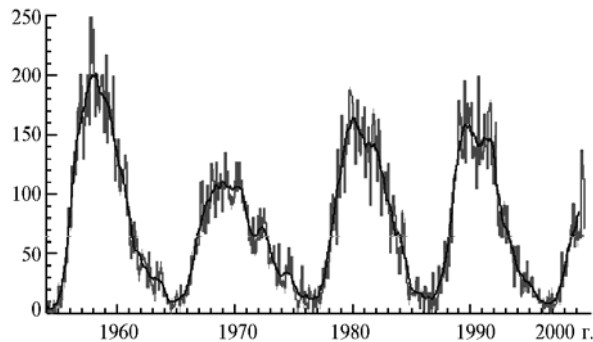


Рис. 3. Числа Вольфа для северного полушария

Таблица 3

Средние суточные суммы суммарной радиации (МДж/м<sup>2</sup>) на TOR-станции

Месяц	Год									
	1995	1996	1997	1998	1999	Среднее	Min	Max	$V$	
I	–	2,69	2,28	2,56	2,38	<b>2,49</b>	0,49	5,01	0,413	
II	–	6,78	5,59	4,97	5,82	<b>5,80</b>	1,80	11,54	0,429	
III	–	13,64	11,88	13,00	11,93	<b>12,65</b>	3,25	21,10	0,246	
IV	–	16,65	18,08	12,55	15,16	<b>15,29</b>	3,62	24,76	0,413	
V	20,06	20,53	21,73	19,81	22,31	<b>20,81</b>	3,93	31,90	0,319	
VI	17,04	22,73	22,60	21,63	19,45	<b>20,54</b>	5,02	33,09	0,360	
VII	22,50	21,87	19,62	24,32	24,06	<b>22,50</b>	3,97	32,23	0,292	
VIII	19,21	15,38	14,61	16,16	16,68	<b>16,50</b>	3,03	26,19	0,372	
IX	11,28	8,99	12,54	7,91	11,55	<b>10,52</b>	2,09	20,19	0,456	
X	4,75	4,71	5,85	3,56	–	<b>4,70</b>	0,49	12,58	0,665	
XI	2,26	2,52	2,52	2,23	–	<b>2,38</b>	0,34	6,61	0,596	
XII	1,63	1,40	1,81	0,88	–	<b>1,43</b>	0,32	3,68	0,517	

Междугодовая изменчивость не является основной и составляет всего 10–20% в общей изменчивости радиации, отражающей вариации суточных сумм [5]. Изменчивость ежедневных сумм включает в себя колебания радиации внутри месяца каждого года, обусловленные сменой синоптических процессов, и колебания от года к году, связанные с изменением преобладающих форм общей циркуляции в отдельные годы. В табл. 3 приведены средние суточные суммы

суммарной радиации ( $Q_{сут}$ ), а также их минимальные и максимальные значения, зарегистрированные на TOR-станции. Относительно межсуточной изменчивости следует отметить достаточно устойчивый радиационный режим в марте и июле и в 2,5–3 раза большие вариации для октября и ноября. В то же время резких изменений средних суточных сумм  $Q$  не зарегистрировано. Внутри месяца диапазон колебания суточных сумм менялся в зависимости от сезона.

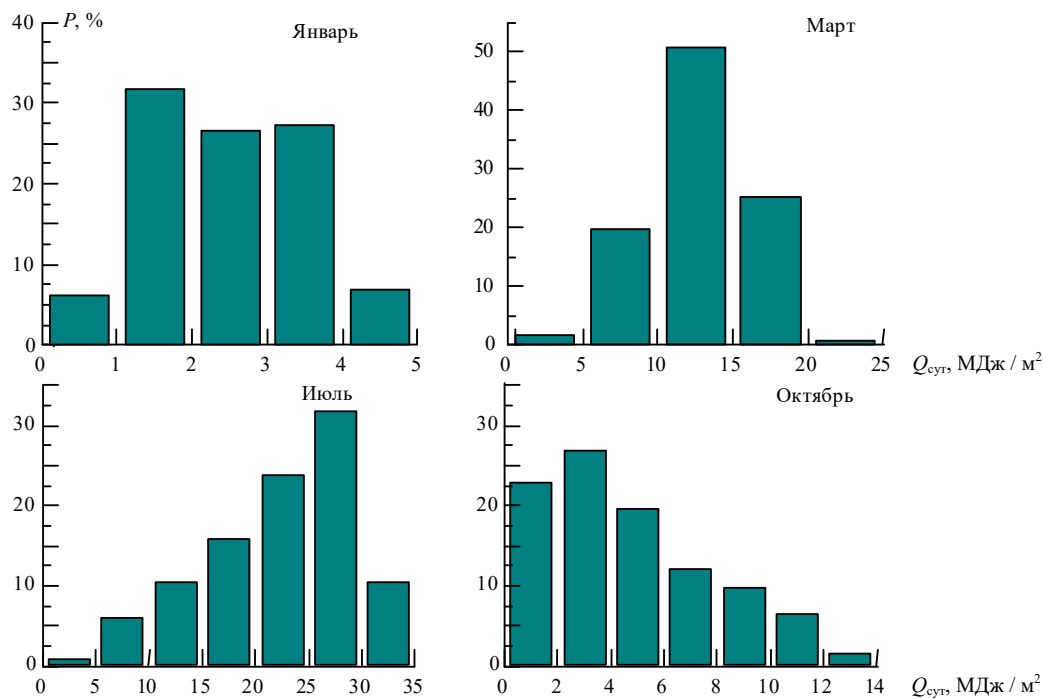


Рис. 4

Рис. 4 демонстрирует повторяемость суточных сумм суммарной радиации в центральные месяцы сезона в районе г. Томска. В марте гистограмма повторяемости суточных сумм симметрична и 50%  $Q_{сут}$  лежит в диапазоне 10÷15 МДж/м<sup>2</sup>. Однако в остальные месяцы кривые распределения суточных сумм имеют асимметричность: в весенне-летний период – отрицательную, а в зимние и осенние месяцы – положительную. Средняя межсуточная изменчивость зимой составила 0,8 МДж/м<sup>2</sup>, максимальная наблюдалась в июне – 7,28 МДж/м<sup>2</sup>, а в переходный период колебалась от 2 до 5 МДж/м<sup>2</sup>.

Авторы [6, 7], проанализировав данные многолетних наблюдений (1964–1994 гг.) мировой радиометрической сети за суммарной солнечной радиацией, определили максимальную и минимально возможные суточные суммы суммарной солнечной радиации для разных широт и каждого месяца года. Сопоставление минимальных и максимальных суточных сумм суммарной радиации, зарегистрированных на TOR-станции, с опубликованными И.В. Морозовой и Г.Н. Мясниковым возможными суммами для широты 56°, показало, что все зарегистрированные суточные суммы попадали в данный диапазон и экстремальных ситуаций за рассматриваемый период не наблюдалось.

В табл. 4 приведены результаты сравнения полученных нами среднемесячных суточных сумм  $Q$  с опубликованными в справочнике [8] и данными более поздних лет по ст. «Огурцово». Из сопоставления видно увеличение суточного прихода солнечной радиации весной и летом в более поздние годы по данным для ст. «Огурцово», что объясняет больший приход суммарной солнечной радиации в весенне-летний период в районе Томска по сравнению с многолетними данными на ст. «Огурцово» (см. табл. 1). В зимний период средние суточные суммы в Томске несколько ниже среднегодовое суточных сумм на ст. «Огурцово», что, скорее всего, объясняется более южным расположением последней.

Таблица 4

Средние суточные суммы суммарной радиации (МДж/м<sup>2</sup>) на TOR-станции и ст. «Огурцово»

Месяц	Томск (1995–1999)	«Огурцово»	
		(до 1968)	(1993–1994)
I	2,49	2,97	–
II	5,80	6,03	–
III	12,65	11,27	–
IV	15,29	14,87	15,92
V	20,81	19,52	18,00
VI	20,54	20,86	23,84
VII	22,50	19,56	21,56
VIII	16,50	15,71	16,62
IX	10,52	11,10	–
X	4,70	5,15	–
XI	2,38	3,02	–
XII	1,43	2,01	–

Представляет интерес зависимость изменчивости суточных сумм суммарной радиации от вида барических образований и типа воздушной массы. Для этого из всего массива данных выделялись дни, когда преобладал определенный вид барического образования (циклон Zn, антициклон Azn) или тип воздушной массы (арктический, умеренный, субтропический). Данная выборка позволила построить годовой ход суточных сумм суммарной радиации для циклона и антициклона.

Из рис. 5, а видно, что при антициклоне суточный приход суммарной радиации больше в течение всего года. При этом абсолютная разница средних суточных сумм  $Q$  между антициклоном и циклоном растет от зимы к лету. Очевидно, что абсолютная величина разницы обусловлена увеличением продолжительности солнечного сияния в летнее время. В действительности, различия в приходе суммарной радиации между антициклоном и циклоном сохраняются в течение всего года. Об этом можно судить по рис. 5, б, на котором показано отношение суточных сумм в антициклоне и циклоне. В среднем это отношение равно 1,8 и колеблется от 1,6 до 2,2, за исключением декабря, данные для которого не приводятся. Дело в том, что величина суммарной радиации в этот месяц очень мала, поэтому любые аномалии в приходе радиации существенно изменяют величину отношения. Если обобщить данные рис. 5, а и б, то можно прийти к выводу, что приход суммарной солнечной радиации в антициклоне и циклоне в районе г. Томска зависит от вида барического образования и в среднем в антициклоне больше в 1,8 раза, чем в циклоне.

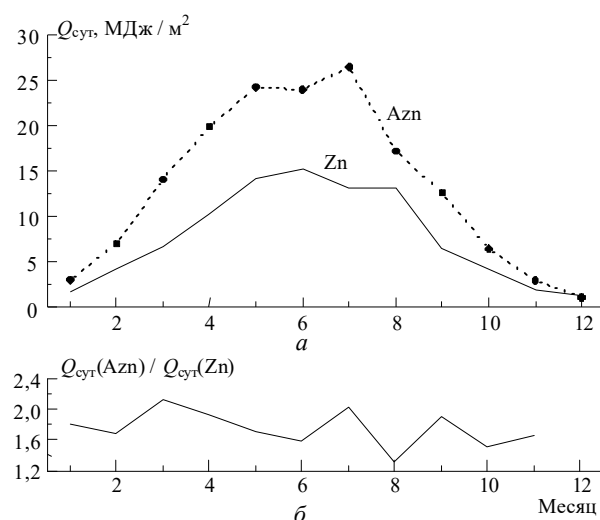


Рис. 5. Зависимость суточных сумм суммарной радиации от барического образования: Zn – циклон, Azn – антициклон

Очевидно, что в реальных условиях на изменение радиационных характеристик влияет и смена воздушных масс. Для Томской области характерно преобладание арктической и умеренной воздушных масс. В рассматриваемый период 470 дней были с арктической воздушной массой (КАВ), 374 с умеренной (КУВ), 59 – с субтропической (КСВ) и только 3 дня с тропической воздушной массой. Надо отметить, что для КСВ кривая изменения суточных сумм имеет больше качественный характер, так как статистически она плохо подкреплена и требуется более длинный ряд наблюдений для достоверности вывода. Поэтому остановимся на сравнении двух воздушных масс – арктической и умеренной. При этом подчеркнем, что из выборки были исключены дни, когда в течение суток происходила смена типа воздушной массы.

Из рис. 6 видно, что в течение года соотношение в приходе суммарной радиации в арктической и умеренной воздушных массах изменяется. Так, если с ноября по март величины суточных сумм радиации в обеих воздушных массах близки между собой, то в другие периоды соотношение в приходе суммарной радиации между этими воздушными

массами может изменяться в большую и меньшую стороны. Это несколько противоречит устоявшимся понятиям. По-видимому, здесь находит отражение особенность циркуляции воздуха над регионом в теплый период. В апреле для Западной Сибири характерен максимум аэрозольной оптической толщи, который создается переносом в средней тропосфере из более южных районов аэрозольных частиц, образовавшихся после схода снежного покрова [9]. В мае линия снежного покрова приближается к территории Западной Сибири и соотношение ослабляющих и рассеивающих факторов в регионе выравнивается. В летний период при более чистой в среднем арктической воздушной массе сказывается ослабляющее действие общей и нижней облачности в ней.

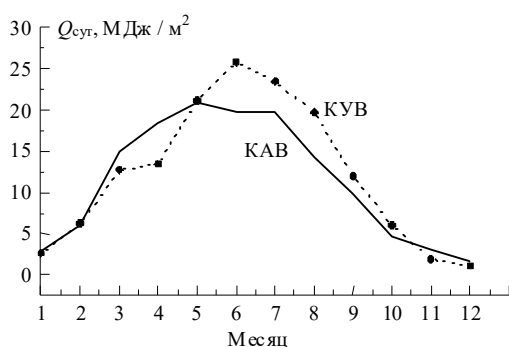


Рис. 6. Зависимость суточных сумм суммарной радиации от типа воздушной массы: КАВ – арктическая, КУВ – умеренная

Из табл. 5 видно, что в летний период в арктической воздушной массе, по сравнению с умеренной, преобладали дни с общей облачностью 8–10 баллов и нижней облачностью больше 5 баллов. Это привело к уменьшению суточных сумм по сравнению с умеренной воздушной массой почти на 20%. На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- в целом за рассматриваемый период в районе г. Томска наблюдался достаточно устойчивый радиационный режим с минимальными колебаниями как месячных, так и суточных сумм суммарной радиации в марте;
- полученные на ТОР-станции данные о суммарной солнечной радиации хорошо коррелируют с данными измерений на близрасположенных станциях как по величине, так и по годовому ходу;

*B.D. Belan, T.K. Sklyadneva. Measurements of total solar radiation near Tomsk.*

In this paper present some results of monitoring of the total solar radiation which is performed the TOR-station of IAO SB RAS since April 1995. Some results of an evaluation of the radiation regime nearby Tomsk have been verified by the comparison of actinometric data of Ogurtsovo station. We have revealed that during the period of the study quite steady radiation regime with maximum of incoming solar radiation in July was observed. Amount and variation range of the monthly solar radiation varied depending on the season. During wintertime the coefficient of variation of the monthly radiation varied from 5 to 9% and from 2 to 24% during transition period. The amount of the solar radiation income depending on air mass type and synoptic condition has been investigated. It is noted that amount of diurnal solar radiation in winter season does not depend on types of pressure field and air mass. During other periods diurnal solar radiation sums are larger at the presence of anticyclones.

– особенностью радиационного режима в районе Томска является смещение максимума суммарной радиации на июль;

– наблюдается сложная зависимость прихода суммарной солнечной радиации в течение года в зависимости от типа воздушных масс, которая отражает особенности общей циркуляции атмосферы над регионом;

– величина суточной суммы суммарной радиации при антициклоне в среднем выше в 1,8 раза, чем при циклоне в течение всего года.

Таблица 5

Количество дней с арктической и умеренной воздушной массой (1), в том числе с общей облачностью 8–10 баллов (2); с общей облачностью 8–10 баллов и нижней облачностью больше 5 баллов (3)

Месяц	Арктическая			Умеренная		
	1	2	3	1	2	3
I	33	15	-	30	21	5
II	28	15	2	25	17	6
III	28	11	4	30	16	7
IV	30	16	5	24	13	8
V	37	26	17	26	15	7
VI	40	30	20	26	9	3
VII	25	11	8	62	27	7
VIII	50	43	32	27	11	6
IX	69	52	37	22	14	6
X	42	34	25	35	25	13
XI	50	34	14	30	26	19
XII	38	30	11	37	34	24

1. Житорчук Ю.В., Стадник В.В., Шамина И.Н. // Изв. АН. Сер. ФАО. 1994. Т. 30. № 3. С. 389–391.
2. Байкова И.М. // Метеорология и гидрология. 1998. № 1. С. 29–35.
3. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К. и др. // Метеорология и гидрология. 1999. № 3. С. 110–118.
4. Белан Б.Д., Наливайко А.А., Сакерин С.М., Складнева Т.К. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 3. С. 275–281.
5. Пивоварова З.И., Стадник В.В. Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 292 с.
6. Морозова И.В., Мясников Г.Н. // Метеорология и гидрология. 1997. № 10. С. 38–48.
7. Морозова И.В., Мясников Г.Н. // Метеорология и гидрология. 1999. № 9. С. 36–46.
8. Справочник по климату СССР. Вып. 20. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 76 с.
9. Ярхо Е.В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 7. С. 1063–1072.