

УДК 551.510.42

## Радиационный баланс подстилающей поверхности г. Томска в 2004–2005 гг.

Н.В. Дудорова, Б.Д. Белан\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 23.01.2015 г.

Представлены результаты определения радиационного баланса и его составляющих для г. Томска в период 2004–2005 гг. Показано, что большую часть года радиационный баланс г. Томска положительный, а с ноября по январь имеет отрицательные значения. Максимум наблюдается в июне и равен  $176 \text{ Вт/м}^2$  в 2004 г. и  $167 \text{ Вт/м}^2$  в 2005 г. Минимум отмечается в декабре и равняется  $-26 \text{ Вт/м}^2$  в 2004 г. и  $-41 \text{ Вт/м}^2$  в 2005 г.

*Ключевые слова:* город, радиационный баланс, эффективное излучение, суммарная радиация, альbedo; city, radiation balance, effective radiation, total radiation, albedo.

### Введение

Современный город отличается от окружающей его местности наличием большого количества зданий и сооружений, которые служат дополнительным источником поступления тепла в атмосферный воздух, в результате чего повышается температура воздуха на его территории. Это явление получило название «городской остров тепла» [1]. Разница температур между центром и окраиной города может достигать  $12 \text{ }^\circ\text{C}$  и зависит от многих факторов [2]. Основные причины изменения теплового баланса городской подстилающей поверхности, приводящие к образованию острова тепла, — прямые выбросы тепла вследствие хозяйственной деятельности человека, а также изменение альbedo подстилающей поверхности и радиационного баланса из-за дополнительного поглощения солнечной радиации антропогенными примесями (газами и аэрозолями) [3].

Радиационный баланс подстилающей поверхности — основная компонента теплового баланса. Уравнение для теплового баланса подстилающей поверхности, отражающее закон сохранения энергии при взаимодействии солнечного, атмосферного и земного излучений, с учетом хозяйственной деятельности человека можно записать в виде [4]:

$$R + Q_F = Q_S + Q_H + Q_E + Q_T, \quad (1)$$

где  $R$  — радиационный баланс подстилающей поверхности;  $Q_F$  — поток антропогенного тепла,  $Q_S$  — поток тепла между подстилающей поверхностью и нижележащими слоями,  $Q_H$  — турбулентный поток

тепла между подстилающей поверхностью и атмосферой,  $Q_E$  и  $Q_T$  — потоки тепла, связанные с фазовыми преобразованиями воды,  $Q_E$  — с испарением и конденсацией,  $Q_T$  — с таянием льда и замерзанием воды.

Радиационный баланс, представляющий собой разность между приходящей и уходящей радиацией, принимает как положительные, так и отрицательные значения. Отличная от нуля разность между приходящей и уходящей радиацией является причиной возникновения потоков тепла в атмосферу и почву. Соответственно, изменение микроклимата и типа городской подстилающей поверхности, приводящее к изменению радиационного баланса, существенным образом влияет на потоки тепла в городе.

Томск является городом, расположенным в средних широтах ( $56^\circ$  с. ш.), с выраженным континентальным климатом и типичной для российских городов подстилающей поверхностью. Последние 10–15 лет наблюдаются заметное расширение города, сопровождающееся строительством множества новых зданий, а также существенное увеличение количества транспорта. В таких условиях, очевидно, становится актуальным получение знаний о радиационном балансе города и его влиянии на общий тепловой баланс.

Радиационный баланс подстилающей поверхности  $R$ , определяемый как разность между поглощенной солнечной радиацией и эффективным излучением подстилающей поверхности [5], может быть непосредственно измерен актинометрическим балансометром. Однако использование балансометров для долговременных стационарных измерений затруднено в связи с невозможностью их применения в ряде метеословий [6].

\* Нина Викторовна Дудорова (ninosh@mail.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru).

# 1. Методика расчета составляющих радиационного баланса

Для расчета радиационного баланса подстилающей поверхности применяют следующее выражение [1, 6]:

$$R = Q(1 - A) - B_n^* \quad (2)$$

где  $Q = I + i$  – нисходящее солнечное излучение,  $I$  и  $i$  – прямое и рассеянное атмосферой солнечное излучение;  $A$  – альbedo подстилающей поверхности;  $B_n^*$  – эффективное излучение подстилающей поверхности.

При этом поток нисходящего коротковолнового солнечного излучения  $Q$  измеряется с помощью пиранометров. Для определения эффективного излучения подстилающей поверхности  $B_n^*$  обычно используются подходы на основе измерения температуры воздуха и подстилающей поверхности, давления водяного пара и облачности [1].

Для расчета радиационного баланса г. Томска использовались измеренные данные из следующих источников. Значения суммарной солнечной радиации получены на TOR-станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН [7, 8], осуществляющей ежечасный мониторинг параметров атмосферы. Альbedo подстилающей поверхности рассчитывалось на основе ежемесячных измерений с самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» [9–11], предназначенного для измерения количества загрязняющих веществ в воздухе и на подстилающей поверхности. Метеорологические параметры – температура воздуха и почвы, влажность воздуха и общий балл облачности – предоставлены Томским ЦГМС – филиалом ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» [12].

Исследование радиационного баланса выполнено для 2004 и 2005 гг., которые по метеорологическим характеристикам являются довольно типичными для климата г. Томска. На рис. 1 приведен годовой ход метеорологических параметров в 2004–2005 гг., а также их значений, усредненных за 11 лет с 1995 по 2005 г. Среднегодовые значения метеорологических параметров представлены в табл. 1. Отклонение данных параметров от их средних значений, как будет показано ниже, проявляется в изменении составляющих радиационного баланса (2).

Среднегодовые значения метеорологических величин в 2004 и 2005 гг. и осредненные за 11 лет (1995–2005)

Период	$t, ^\circ\text{C}$	$Rh, \%$	$V, \text{ м/с}$	$P, \text{ мм рт. ст.}$	$Q, \text{ Вт/м}^2$	$s, \text{ г/кг}$
2004	2,16	74,63	2,12	747,58	129,02	4,33
2005	2,45	74,27	2,06	749,74	125,76	4,46
1995–2005	2,36	78,89	2,62	748,33	141,89	4,88

## 1.1. Нисходящее коротковолновое излучение

Классический вариант годового хода суммарной солнечной радиации имеет колоколообразный вид с максимумом для средних широт в июне, когда высота солнца максимальна, и минимумом в декаб-

ре. На рис. 2 пунктирной линией с крестиками показаны значения возможной суммарной радиации  $Q_0$  для широты  $55^\circ$  [13]. Возможная суммарная радиация – это суммарная радиация, которая могла бы поступить в данном географическом пункте при безоблачном небе, характерных для этого места условиях прозрачности атмосферы и типичных значениях альbedo подстилающей поверхности.

Ввиду того что суммарная солнечная радиация сильно зависит не только от высоты солнца, но также и от степени облачности и условий прозрачности атмосферы, в годовом ходе  $Q$  наблюдаются некоторые отклонения от классических представлений. В работах [14, 15] представлена оценка этих зависимостей для Томска, в [16] – для территории Западной Сибири.

Годовой ход суммарной солнечной радиации в г. Томске, как видно из рис. 2, имеет классический колоколообразный вид. При этом максимум  $Q$  в обоих годах наблюдается в июне, составляет  $297 \text{ Вт/м}^2$  в 2004 г. и  $264 \text{ Вт/м}^2$  в 2005 г. Минимум отмечается в декабре и равняется  $17 \text{ Вт/м}^2$  в 2004 г.,  $19 \text{ Вт/м}^2$  в 2005 г.

## 1.2. Альbedo подстилающей поверхности города

Расчет альbedo подстилающей поверхности выполнялся на основе измерений солнечной радиации с помощью пиранометров, установленных на самолете-лаборатории [17]. На рис. 3 приведен годовой ход альbedo городской подстилающей поверхности для выбранного периода. Видно, что минимальные значения  $A$  наблюдаются в бесснежный период и составляют  $0,04$ – $0,16$ . Зимой значение альbedo возрастает до  $0,25$ – $0,56$ , что соответствует значениям загрязненного снега по данным М.И. Будыко [18].

## 1.3. Эффективное излучение подстилающей поверхности города

Эффективное излучение подстилающей поверхности  $B_n^*$  определяется температурой и типом подстилающей поверхности, общим количеством облаков, а также излучательной способностью атмосферы, зависящей от содержания водяного пара. В безоблачную погоду оно представляет собой разность между собственным излучением подстилающей поверхности  $B_0$  и поглощенной ею частью встречного излучения атмосферы  $B_A$  [1]:

$$B^* = B_0 - \delta B_A \quad (3)$$

где  $\delta$  – относительный коэффициент поглощения длинноволновой радиации подстилающей поверхностью, в данной работе мы принимаем его равным зимой  $0,98$ , летом –  $0,97$  [1].

Поток излучения подстилающей поверхности  $B_0$  определяли по выражению [1]:

$$B_0 = \delta \sigma T_0^4 \quad (4)$$

( $T_0$  – абсолютная температура подстилающей поверхности;  $\sigma = 5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана–Больцмана).

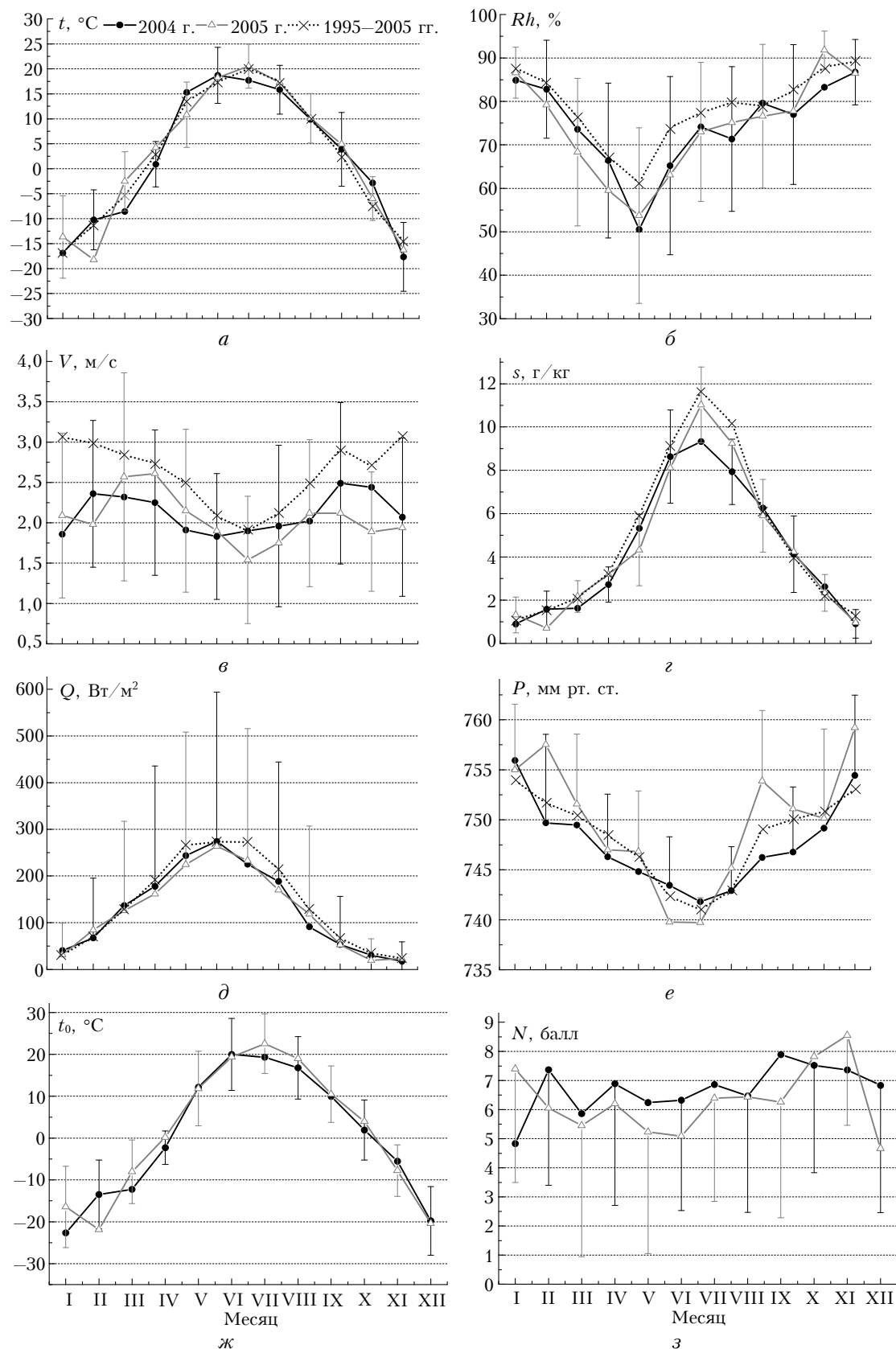


Рис. 1. Годовой ход метеорологических параметров и их средних величин за 11 лет (1995–2005) в г. Томске в 2004 и 2005 гг.: а – температура воздуха; б – относительная влажность воздуха; в – скорость ветра; г – удельная влажность воздуха; д – суммарная солнечная радиация; е – атмосферное давление; ж – температура поверхности почвы; з – общий балл облачности

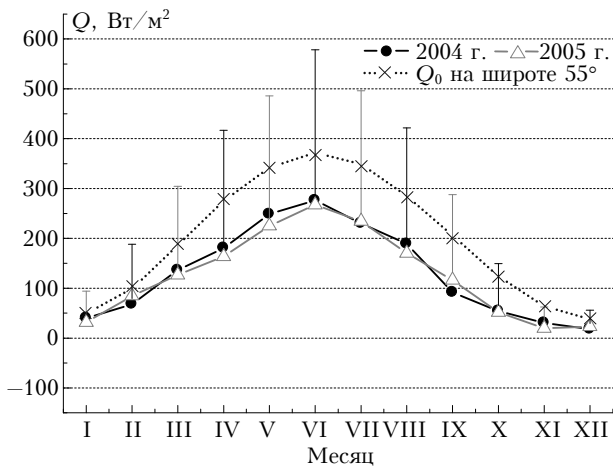


Рис. 2. Годовой ход суммарной солнечной радиации в г. Томске в 2004 и 2005 гг. и максимально возможная ее величина на широте 55°

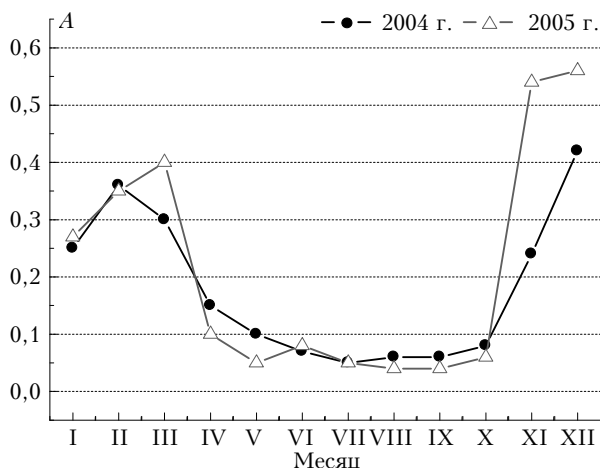


Рис. 3. Годовой ход альbedo городской подстилающей поверхности

Формула Д. Брента для случая безоблачного неба [1], по которой рассчитывался поток встречного излучения атмосферы  $B_A$ , имеет следующий вид:

$$B_A = \sigma T^4 (a_1 + b_1 \sqrt{e}). \quad (5)$$

Здесь  $T$  — температура воздуха, К; множитель, стоящий в скобках  $(a_1 + b_1 \sqrt{e})$ , характеризует излучательную способность атмосферы и зависит от содержания водяного пара,  $a_1 = 0,526$  и  $b_1 = 0,065$  — эмпирические коэффициенты;  $e$  — парциальное давление водяного пара, гПа.

Известно, что большое влияние на встречное излучение атмосферы и, соответственно, на эффективное излучение земной поверхности оказывают не только содержание водяного пара, но и количество и высота облаков [1]. Эффективное излучение подстилающей поверхности с учетом облачности  $B_n^*$  рассчитывалось по формуле

$$B_n^* = B^* [1 - cn], \quad (6)$$

где  $c$  — среднее значение эмпирического коэффициента, равное 0,77 для холодного полугодия и 0,70 для теплого;  $n = N/10$  — общее количество облаков в долях единицы ( $N$  — общее количество облаков в баллах).

На рис. 4 представлен годовой ход эффективного излучения подстилающей поверхности. Видно, что максимальные значения  $B_n^*$  наблюдаются в теплое время года, минимальные — в холодное. Максимум потока эффективного излучения в данных широтах обычно имеет место в июне (рис. 4, годовой ход эффективного излучения подстилающей поверхности в 2004 г.).

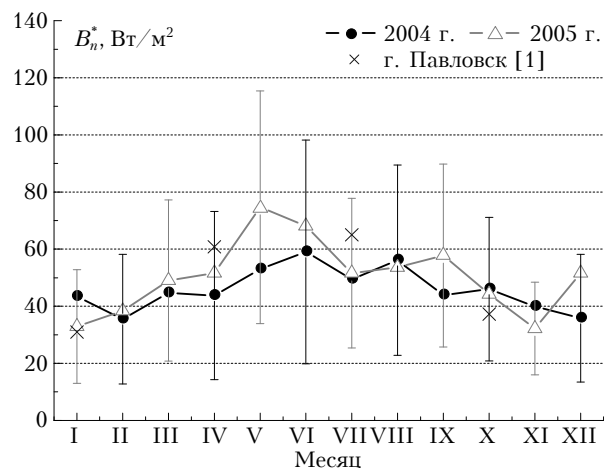


Рис. 4. Годовой ход эффективного излучения подстилающей поверхности

В 2005 г. отмечен сдвиг максимума на май. Это объясняется тем, что температура воздуха в мае 2005 г. была значительно ниже, чем в 2004 г., в то время как температура поверхности почвы практически совпала (см. рис. 1, а, ж). Следует подчеркнуть, что согласно (6) колебания среднемесячных значений  $B_n^*$  определяются колебаниями облачности (см. рис. 1, з). Так, например, появление второго максимума в сентябре 2005 г. вызвано низким баллом облачности — общее количество облаков в сентябре 2005 г. было на 2 балла ниже, чем в сентябре 2004 г.

Можно отметить, что рассчитанное эффективное излучение подстилающей поверхности хорошо согласуется с результатами, полученными Л.Т. Матвеевым для г. Павловска [1]. Более низкие значения эффективного излучения в холодное полугодие в Павловске можно объяснить более влажным климатом и более облачной погодой, чем в Томске, и наоборот в теплое полугодие.

## 2. Результаты и обсуждение

На рис. 5 приведен годовой ход радиационного баланса городской подстилающей поверхности г. Томска в сравнении с таковым в г. Лодзь — наиболее близком по своим характеристикам, опубликованным в литературе [19].

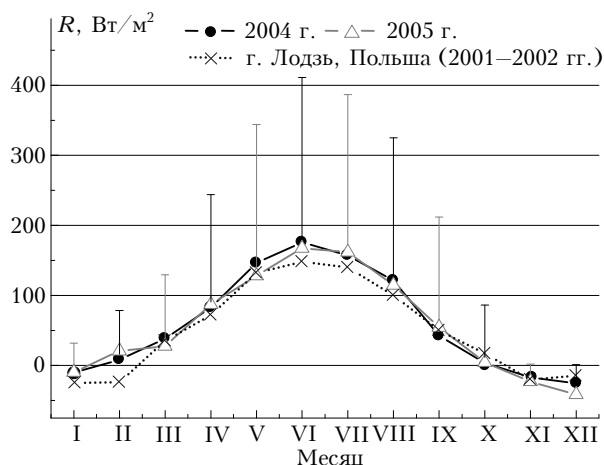


Рис. 5. Годовой ход радиационного баланса подстилающей поверхности городов Томск и Лодзь

Видно, что большую часть года радиационный баланс  $R$  положительный, а в ноябре, декабре и январе имеет отрицательные значения. Максимум наблюдается в июне и составляет  $176 \text{ Вт/м}^2$  в 2004 г. и  $167 \text{ Вт/м}^2$  в 2005 г., что несколько больше, чем в г. Лодзь. Минимальное значение  $R$  отмечается в декабре, когда собственное излучение земной поверхности превышает приходящую коротковолновую радиацию из-за низких температур воздуха и короткого светового периода. В 2004 г. минимум равен  $-26 \text{ Вт/м}^2$  и в 2005 г.  $-41 \text{ Вт/м}^2$ .

Годовой ход радиационного баланса подстилающей поверхности Томска в 2004 и 2005 гг. практически повторяется. Самые большие различия  $R$  между годами наблюдаются в мае. Это связано с заметной разницей температуры воздуха между годами, которая в мае составила  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  (см. рис. 1, а). Следует

отметить, что отличие радиационного баланса городов Томск и Лодзь также не столь существенно.

На рис. 6 представлен суточный ход радиационного баланса подстилающей поверхности г. Томска. Видно, что максимальные значения  $R$  наблюдаются в полуденные часы летом, когда пиковые значения радиационного баланса в обоих годах достигали  $780 \text{ Вт/м}^2$ . В ночные часы на протяжении всего года  $R$  принимает отрицательные значения. Здесь также видно, что некоторое увеличение  $R$  в дневные часы в 2005 г., в сравнении с 2004 г., компенсируется уменьшением  $R$  в ночные часы.

### Заключение

Исследование определяющей компоненты теплового баланса — радиационного баланса подстилающей поверхности г. Томска в 2004–2005 гг. — показало, что годовой ход данной характеристики в Томске имеет сглаженный колоколообразный вид с амплитудой около  $200 \text{ Вт/м}^2$ . Отклонение среднемесячных значений радиационного баланса между годами может достигать  $15 \text{ Вт/м}^2$ .

Составляющие радиационного баланса имеют следующие характеристики.

Максимум годового хода суммарной солнечной радиации  $Q$  в г. Томске наблюдается в июне и составляет  $297 \text{ Вт/м}^2$  в 2004 г. и  $264 \text{ Вт/м}^2$  в 2005 г. Минимум имеет место в декабре и равняется  $17 \text{ Вт/м}^2$  в 2004 г.,  $19 \text{ Вт/м}^2$  в 2005 г.

Минимальные значения альбедо отмечаются в бесснежный период и составляют  $0,04$ – $0,16$ . Зимой значение альбедо возрастает до  $0,25$ – $0,56$ .

В годовом ходе эффективного излучения подстилающей поверхности значения  $B_n^*$  максимальны в теплое время года, минимальны — в холодное.

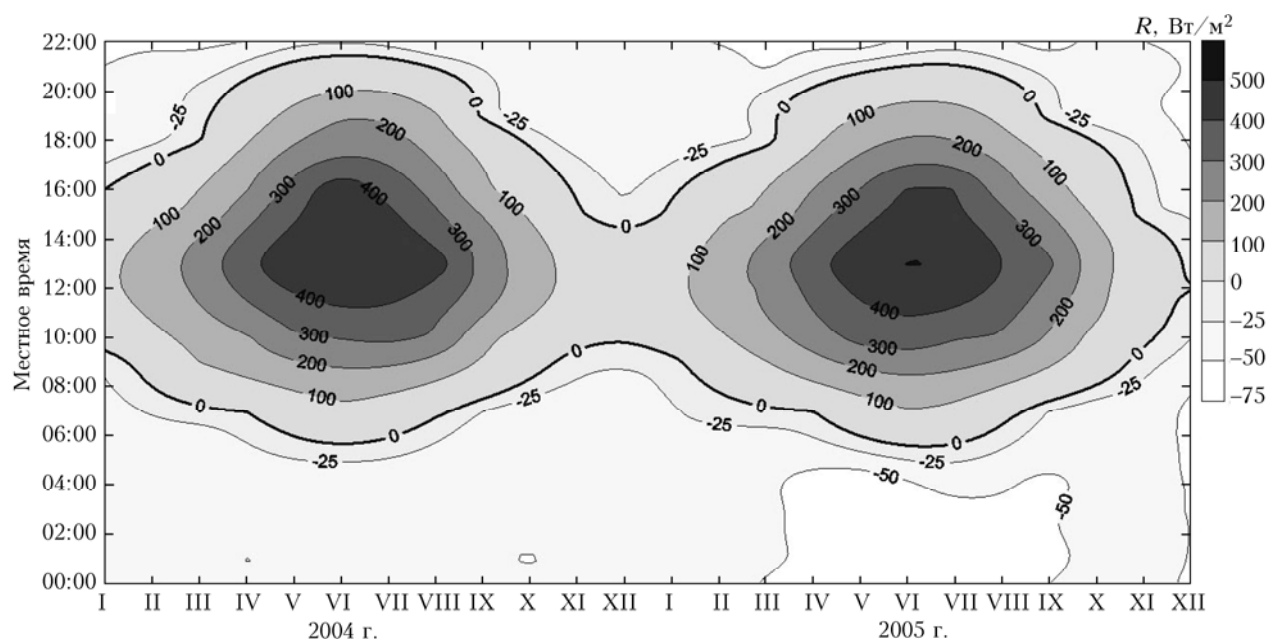


Рис. 6. Среднемесячный суточный ход радиационного баланса подстилающей поверхности г. Томска

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 4, программы ОНЗ РАН № 5, междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН № 35, 70 и 131, грантов РФФИ № 14-05-00526, 14-05-00590, госконтрактов Минобрнауки № 14.604.21.0100 (идентификационный номер RFMTFIBBB210290), 14.613.21.0013 (идентификационный номер RFMEFI61314X0013).

1. *Матвеев Л.Т.* Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеониздат, 2000. 780 с.
2. *Безуглая Э.Ю.* Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 184 с.
3. *Малахов В.М., Сенич В.Н.* Тепловое загрязнение окружающей среды промышленными предприятиями. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 1997. 68 с.
4. *Ландсберг Г.Е.* Климат города. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 248 с.
5. *Хромов С.П., Мамонтова Л.И.* Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеониздат, 1974. 568 с.
6. *РД 52.04.562-96.* Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 5. Актинометрические наблюдения. Ч. 1. Актинометрические наблюдения на станциях. М.: Росгидромет, 1997. 253 с.
7. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Покровский Е.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н.* Автоматический пост для мониторинга малых газовых составляющих атмосферного воздуха // Метеорол. и гидрол. 1999. № 3. С. 110–118.
8. URL: <http://lop.iao.ru/activity/?id=tor>
9. *Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мелешкин В.Е., Микушев М.К., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Покровский Е.В., Сакелин С.М., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Тумаков А.Г., Шаманаев В.С., Щербатов А.И.* Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5, № 10. С. 1012–1021.
10. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.С., Козлов В.С., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сафатов А.С., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П.* Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э»: 20 лет исследований окружающей среды // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 950–957.
11. URL: <http://lop.iao.ru/activity/?id=fly>
12. URL: <http://www.meteotomsk.ru/site>
13. *Кондратьев К.Я.* Актинометрия. Л.: Гидрометеониздат, 1965. 693 с.
14. *Белан Б.Д., Скляднева Т.К.* Результаты измерения суммарной солнечной радиации в районе Томска // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13, № 4. С. 386–391.
15. *Скляднева Т.К., Белан Б.Д.* Радиационный режим в районе г. Томска в 1995–2005 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 1. С. 62–67.
16. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Скляднева Т.К., Фофонов А.В., Machida T., Sasakawa M.* Пространственно-временная изменчивость суммарной солнечной радиации на территории Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 8. С. 659–664.
17. *Белан Б.Д., Скляднева Т.К., Ужегова Н.В.* Различия альбедо подстилающей поверхности г. Новосибирска и его окрестностей // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 3. С. 238–241.
18. *Будыко М.И.* Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеониздат, 1956. 242 с.
19. *Offerle V., Grimmond C.S.B., Fortuniak K.* Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre // Int. J. Climatol. 2005. V. 25, N 10. P. 1405–1419.

***N.V. Dudorova, B.D. Belan. Radiation balance of the underlying surface in Tomsk in 2004–2005.***

Results of definition of the radiation balance and its components for Tomsk during 2004–2005 are presented. It is shown that the radiation balance of Tomsk is mainly positive during a year, and has negative values only from November to January. The maximum is observed in June; it made 176 W/m<sup>2</sup> in 2004 and 167 W/m<sup>2</sup> in 2005. The minimum is observed in December; it made –26 W/m<sup>2</sup> in 2004 and –41 W/m<sup>2</sup> in 2005.