

УДК 551.521.3

Потоки солнечной радиации в безоблачной атмосфере Западной Сибири: сравнение результатов моделирования и натуральных измерений

Т.Б. Журавлева, С.М. Сакерин, Т.В. Бедарева, Д.М. Кабанов,
И.М. Насртдинов, Т.Ю. Чеснокова*

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

Поступила в редакцию 30.05.2013 г.

Представлено сравнение результатов расчетов и измерений потоков нисходящей солнечной радиации на поверхности Земли, выполненных в безоблачной атмосфере летом 2010–2012 гг. в фоновом районе бо-реальной зоны Сибири (г. Томск). Сопоставление выполнено с учетом инструментальных ошибок и по-грешностей определения характеристик атмосферы. Для задания оптических характеристик аэрозоля ис-пользованы данные фотометрических наземных измерений, полученных на Томской станции сети AERONET. Показано, что относительные различия модельных и экспериментальных значений потоков прямой и суммарной радиации в среднем не превышают 1 и 3% соответственно.

Ключевые слова: аэрозоль, прямая и рассеянная солнечная радиация, натуральный эксперимент, числен-ное моделирование; aerosol, direct and diffuse solar radiation, field experiment, numerical simulation.

Введение

В течение двух последних десятилетий в раз-личных регионах земного шара был выполнен ряд исследований [1–11], цель которых состояла в со-вместном анализе результатов наземных измерений и расчетов интегральных по спектру потоков пря-мой S , диффузной D и суммарной Q солнечной радиации в безоблачной атмосфере с использовани-ем одного или нескольких радиационных кодов и набора входных параметров, максимального соот-ветствующих условиям проведения эксперимента. Такого рода комплексные эксперименты, называе-мые замкнутыми радиационными экспериментами (ЗРЭ), направлены на оценку адекватности суще-ствующих представлений о переносе излучения в атмосфере и включают следующие аспекты:

- инструментально-методические проблемы ка-чества измерений радиации и определения оптиче-ских характеристик атмосферы;
- тестирование радиационных кодов (в част-ности, методов учета многократного рассеяния и молекулярного поглощения);
- проверки используемых моделей аэрозольно-газового состава атмосферы, характеристик подсти-

лающей поверхности, банков данных спектроскопи-ческой информации и солнечной постоянной и т.д.

Результаты, полученные в ходе ЗРЭ, показа-ли, что при достаточно хорошем соответствии меж-ду расчетами и измерениями S разница между модельными и экспериментальными значениями D может быть существенной. Так, авторами [5] уста-новлено, что относительное различие потоков пря-мой радиации (δS) в среднем не превышает 1%, а устранение эффекта «смещение нуля» (zero-off-set) уменьшает отмеченное в работах [1, 8] превышение модельных значений D над экспериментальными до величины $\delta D = 1,9\%$. Согласно [7] при учете спек-тральной зависимости оптических характеристик аэрозоля среднее различие между расчетами и из-мерениями уменьшается и составляет 0,2 и 0,8% для потоков прямой и диффузной радиации соответ-ственно. В то же время представленные в [6] сравне-ния констатируют более значительные расхождения модельных и экспериментальных значений радиа-ционных потоков – 1,8% для S и 5,2% для D .

Эти результаты свидетельствуют о том, что проблему «замыкания» как для прямой, так и диф-фузной радиации до сих пор нельзя считать полно-стью решенной, что мотивирует дальнейшие исследо-вания, включая проведение ЗРЭ в разных регионах и условиях. Замкнутые радиационные эксперимен-ты, ориентированные на уточнение современных представлений об атмосферном аэрозоле, в боль-шинстве случаев осуществлялись в густонаселенных

* Татьяна Борисовна Журавлева (ztb@iao.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Татьяна Владимиров-на Бедарева (btv@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Ильмир Мансурович Насртдинов (wizard@iao.ru); Татьяна Юрьевна Чеснокова (ches@iao.ru).

(Нидерланды [4, 7], Швейцария [6]) и сельских районах (штат Оклахома, США [5, 11]) умеренных широт Северного полушария и др. Для территории России отметим работы, опирающиеся на данные радиационных экспериментов в г. Москве (Московский государственный университет, Звенигородская научная станция ИФА РАН [10, 11]). В этой связи целесообразным является проведение аналогичных тестовых экспериментов и в условиях бореальной зоны Азии, занимающей большую территорию и в силу этого играющей значимую роль в формировании радиационного баланса планеты.

Целью настоящей работы является анализ результатов замкнутых радиационных экспериментов, которые выполнялись летом 2010–2012 гг. в обсерватории «Фоновая», расположенной в 60 км западнее г. Томска. Район измерений характеризуется достаточно однородной подстилающей поверхностью и не подвержен влиянию антропогенных загрязнений, т.е. является типичным фоновым районом Западной Сибири.

1. Экспериментальные данные

Радиационные характеристики. Во время проведения ЗРЭ измерялись потоки прямого S_{\perp} и суммарного Q излучения с использованием пиргелиометра MS-53 и пиранометра MS-802 (спектральный диапазон 0,305–2,8 мкм). На основе совместных измерений MS-802 и MS-53 определялась также диффузная солнечная радиация (как разность между суммарной и прямой $D = Q - S$, где $S = S_{\perp} \mu_0$, $\mu_0 = \cos \xi_0$, ξ_0 – зенитный угол Солнца).

Погрешности измерений потоков этими приборами приведены в табл. 1.

Таблица 1

Погрешности измерений прямой S и суммарной радиации Q (согласно паспортным данным)

Тип погрешности	MS-53	MS-802
Относительная погрешность измерений	$\pm 1,5\%$	$\pm 1,5\%$
Нелинейность	$\pm 0,5\%$ (100–1000 Вт/м ²)	$\pm 0,2\%$
Температурная погрешность	$\pm 2\%$ (–10 °C, +40 °C)	$< \pm 1\%$
Азимутальная и косинусная зависимость	–	$< \pm 10$ Вт/м ²
Спектральная селективность	–	2,1%
Возможный наклон прибора	–	$< \pm 0,2\%$
Нестабильность	–	0,5%
«Смещение нуля»	–	± 2 Вт/м ²

Совокупные ошибки измерений прямой радиации складываются из относительной погрешности измерений ($\delta_{изм,1} = \pm 1,5\%$), а также эффектов нелинейности ($\delta_{изм,2} = \pm 0,5\%$) и температурной погрешности ($\delta_{изм,3} = \pm 2\%$). В предположении, что все эти типы ошибок являются независимыми друг от

друга, верхняя граница ошибок измерений оценивается согласно формуле

$$\delta S_{изм} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{er}} \delta_{изм,i}^2}, \quad N_{er} = 3 \quad (1)$$

и составляет $\sim 2,5\%$. По аналогии с формулой (1), погрешность измерений суммарной радиации (без учета косинусной зависимости и «смещения нуля») $\delta Q_{изм} = 2,8\%$.

Характеристики атмосферы. Как известно, приходящая радиация наиболее чувствительна к изменению спектральной аэрозольной оптической толщи (τ_{λ}^a , λ – длина волны), альbedo (A_{λ}^a) и индикатрисы однократного рассеяния (или фактора асимметрии (μ_{λ}^a)) аэрозоля, а также влагосодержания атмосферы W . Для определения этих характеристик использовались методы солнечной фотометрии атмосферы и фильтровые фотометры различного типа: сетевой Sun-Sky-радиометр CE-318 (AERONET [12]), измеряющий прямую и рассеянную радиацию в восьми спектральных участках в диапазоне 0,34–1,02 мкм, и многоволновой солнечный фотометр типа SP-6(9), измеряющий прямую радиацию в 16 спектральных участках в интервале 0,34–2,14 мкм.

Абсолютная калибровка пиранометра MS-802 и пиргелиометра MS-53 проведена в сентябре 2011 г. специалистами Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова в районе Кисловодска. Радиометр CE-318 калибровался в начале 2011 и в конце 2012 гг. в GSFC/NASA (Гринбелт, США) путем сопоставления с вторичным эталоном – мастер-прибором, прокалиброванным в горной обсерватории Мауна-Лоа. Калибровка фотометров SP-6(9) осуществлялась «долгим методом Бутера» в ситуациях высокой и стабильной прозрачности атмосферы в районе г. Томска. Кроме того, была выполнена интеркалибровка двух типов солнечных фотометров, подтвердившая допустимый уровень погрешности измерений аэрозольной оптической толщи (0,01–0,02).

Отметим, что даже при тщательном контроле за приборами радиационного комплекса возможны ситуации, когда в экспериментальных данных могут дополнительно проявиться негативные эффекты воздействия окружающей среды, такие как изменение пропускания входных окон приборов. К числу таких эффектов, которые мы обобщенно будем называть «запылением», относятся запотевание или запыление, наличие отдельных капель, а также следов мелких насекомых или «облаков» мошки вблизи приборов, что характерно для таежной зоны. Подчеркнем, что речь идет именно о небольшом «запылении», которое не всегда можно заметить. Следствием такой дополнительной погрешности является небольшое уменьшение измеряемых сигналов с соответствующим изменением искомых характеристик.

При гарантированной калибровке приборов, использовании надежных радиационных кодов и методов, обеспечивающих качественное восстановление оптических характеристик атмосферы, распределение различий $\Delta X = X_{\text{расч}} - X_{\text{изм}}$ ($X = S, D, Q$) будет симметричным относительно нуля, а ширина распределения — характеризовать совокупную погрешность измерений и расчетов потоков радиации. Следствием «запыления» пиранометра и пиргелиометра являются занижение значений измеренных потоков прямой и суммарной радиации и, соответственно, сдвиг центров распределений $\{\Delta S\}$ и $\{\Delta Q\}$ в положительном направлении. «Запыление» входного окна фотометра приводит к противоположному результату: измеренное значение аэрозольной оптической толщины (АОТ) окажется более высоким, чем в реальности. Использование завышенных значений АОТ в модельных расчетах радиации приведет к уменьшению ΔS и — в меньшей степени — ΔQ и, соответственно, к смещению центров распределений $\{\Delta S\}$ и $\{\Delta Q\}$ в отрицательную область значений.

Интерпретацию результатов ЗРЭ затрудняет также то обстоятельство, что отобранные для анализа экспериментальные данные за 3 года не являются однородными в том смысле, что получены в достаточно большом диапазоне атмосферных условий и, кроме того, состояние приборов радиационного комплекса может отличаться от года к году.

2. Моделирование потоков солнечной радиации

Входные параметры. Входные параметры для радиационных расчетов задавались на основе комбинации: а) данных измерений непосредственно во время проведения ЗРЭ ($\tau_{\lambda}^a, \langle \mu_{\lambda}^a \rangle, W$), б) эмпирических моделей, основанных на результатах многолетних наблюдений в регионе и в) общепринятых моделей аэрозоля и газового состава атмосферы.

Одной из наиболее сложных задач при формировании множества входных параметров является определение альбедо и индикатрисы однократного рассеяния аэрозольных частиц. В данном исследовании использовались отнесенные ко всему столбу атмосферы альбедо однократного рассеяния (АОР) и фактор асимметрии (ФА) индикатрисы рассеяния излучения, восстановленные из фотометрических измерений на основе алгоритма Дубовика—Кинга [13] и двух наших алгоритмов [14, 15] в диапазоне 0,44–1,02 мкм. Применение различных подходов к решению обратной задачи аэрозольного светорассеяния обусловлено тем, что атмосфера над территорией Западной Сибири характеризуется относительно высокой прозрачностью (в летний период среднее $\tau_{0,5}^a \sim 0,15$), и в этих условиях Λ_{λ}^a и $\langle \mu_{\lambda}^a \rangle$ определяются с большей погрешностью по сравнению с условиями более замутненной атмосферы. Численные эксперименты показали [16, 17], что в конкретных ситуациях методы [14, 15] обеспечивают восстановление значений Λ_{λ}^a и $\langle \mu_{\lambda}^a \rangle$, которые согласуются с данными [13] (Level 1.5) в пределах

погрешностей расчетов этих подходов, которые составляют примерно 0,05–0,07 при $\tau_{0,44}^a < 0,2 \div 0,25$. Средние значения АОР для типичных летних условий г. Томска [14, 15] находятся в хорошем (в пределах 5%) соответствии с данными модели, разработанной на основе результатов самолетного зондирования над территорией Западной Сибири в фоновых условиях атмосферы [18, 19]. Кроме того, они близки к оценкам, приведенным в модели континентального аэрозоля (continental average) OPAC [20], и выше по сравнению с данными в модели WCP [21].

Общее влагосодержание атмосферы определялось по данным солнечных фотометров в канале 0,94 мкм. Полученные ранее оценки свидетельствуют [22], что при отсутствии информации о вертикальном распределении водяного пара в задачах, связанных с оценками коротковолновой радиации на нижней границе атмосферы, могут быть использованы модельные профили концентрации H_2O (см., например, локальные модели [23, 24] для территории Западной и Восточной Сибири).

Содержание CO_2 в атмосфере задавалось на основе региональной модели, построенной по данным самолетного зондирования на территории Западной Сибири [25]; для оценки общего содержания озона (ОСО) использовалась база спутниковых данных TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer, <http://toms.gsfc.nasa.gov/>). При проведении радиационных расчетов учитывалось, помимо H_2O , CO_2 и O_3 , поглощение всеми атмосферными газами, данные о которых присутствуют в модели AFGL [26].

Спектральные значения альбедо подстилающей поверхности A_s задавались на основе результатов измерений спутникового сканера MODIS [27].

Расчет интегральных потоков. Для моделирования интегральных потоков солнечной радиации в молекулярно-аэрозольной плоскопараллельной атмосфере использовались развитые ранее алгоритмы метода Монте-Карло [28]. Спектральный интервал 0,3–2,8 мкм разбивался на 21 полосу, в пределах каждой из которых оптические характеристики аэрозоля и альбедо подстилающей поверхности (ПП) полагались постоянными, а функция пропускания аппроксимировалась конечным рядом экспонент. Эффективные коэффициенты молекулярного поглощения рассчитывались на основе базы данных HITRAN-2008 [29] и модели континуума MT_CKD2.4 (<http://rtweb.aer.com>). Спектральный ход солнечной постоянной задавался согласно [30].

В рамках настоящей статьи для определения оптических характеристик аэрозоля использовались фотометрические методы. В связи с этим при моделировании потоков излучения в широком спектральном диапазоне 0,3–2,8 мкм возникают вопросы о точности расчетов, обусловленные тем, что 1) оптические характеристики аэрозоля восстановлены в более узком, чем это необходимо для радиационных вычислений, интервале длин волн (λ_1, λ_2) и 2) восстановленные $\tau_{\lambda}^a, \Lambda_{\lambda}^a$ и $\langle \mu_{\lambda}^a \rangle$ относятся ко всему столбу атмосферы. Для формирования

полного набора входных параметров экстраполяция данных выполнялась следующим образом:

– τ_λ^a для $\lambda \leq \lambda_1 = 0,34$ мкм рассчитывалась с использованием показателя Ангстрема $\alpha(0,34-0,44$ мкм), а при $\lambda \geq \lambda_1 = 1,02$ мкм предполагалось, что $\tau_\lambda^a = \tau_{1,02}^a$ (см., например, [31]);

– $\Lambda_\lambda^a = \Lambda_{0,44}^a$ при $\lambda \leq \lambda_1 = 0,44$ мкм, $\Lambda_\lambda^a = \Lambda_{1,02}^a$ при $\lambda \geq \lambda_2 = 1,02$ мкм; спектральный ход $\langle \mu_\lambda^a \rangle$ задавался аналогично Λ_λ^a .

Вертикальное распределение коэффициента ослабления аэрозоля σ_λ^a задавалось аналогично схеме [28], согласно которой σ_λ^a определялся на основе соотношения $\tau_\lambda^a(0-2$ км) = $\tau_\lambda^{a,meas} - \tau_\lambda^{a,mod}(2-35$ км), где символы «meas» и «mod» соответствуют значениям измеренной (в пределах всей атмосферы) и модельной (в пределах 2–35 км) АОТ. Вертикальный ход модельного распределения $\sigma_\lambda^{a,mod}$ соответствовал модели континентального аэрозоля [20].

Использование упрощенной схемы задания оптических характеристик аэрозоля для вычисления нисходящей радиации на уровне подстилающей поверхности является общепринятым. В частности, в работах [3–5] альbedo однократного рассеяния аэрозоля задавалось на основе *приземных* измерений коэффициентов рассеяния и поглощения в видимой области спектра; авторы [7] использовали для радиационных расчетов данные, представленные на сайте сети AERONET (Level 1.5) для пункта наблюдения, в котором проводились ЗРЭ. Согласно полученным оценкам [18, 32] выбранный нами подход обеспечивает погрешность расчетов, которая не превосходит 1–3 Вт/м² для рассматриваемых АОТ.

В табл. 2 приведены значения характеристик атмосферы, используемые для моделирования потоков, а также кратко описаны метеорологические условия во время проведения измерений.

Представлены два набора величин альbedo однократного рассеяния и фактора асимметрии. Первое множество данных сформировано преимущественно на основе наших методов восстановления Λ_λ^a и $\langle \mu_\lambda^a \rangle$ [14, 15] и модели OPAC [20] для атмосферных ситуаций, характеризующихся высокой прозрачностью атмосферы $\tau_{0,55}^a \sim 0,03$. Второе множество АОР и ФА получено с использованием алгоритма Дубовика–Кинга (Level 1.5). С учетом невысоких значений АОТ ($\tau_{0,55}^a < 0,2$), различие этих характеристик, обусловленное методическими особенностями [13–15], не превосходит в основном 0,05, что соответствует погрешностям восстановления АОР и ФА.

Чувствительность потоков солнечной радиации к точности задания входных параметров. Прежде чем перейти к сопоставлению вычисленных и измеренных потоков солнечной радиации, оценим величину неопределенности в расчетах S , D , Q , которая обусловлена совокупностью ошибок, связанных с моделированием погрешностей при задании входных параметров радиационных расчетов (включая спектроскопическую информацию), использовании приближенного метода расчета функ-

ции пропускания (метод k -распределений), алгоритма метода Монте-Карло и т.д.

1) Погрешности в расчетах функции пропускания при аппроксимации ее рядом экспонент зависят от спектрального интервала и в пределах отдельных полос (сильное поглощение, поглощение несколькими атмосферными газами) могут достигать 1,5% [28, 33, 34], тогда как во всем диапазоне 0,3–2,8 мкм, согласно предварительным оценкам, не превышают 0,3%.

2) В работе [35] представлены оценки влияния моделей континуального поглощения водяного пара на потоки солнечного излучения. В типичных летних условиях Западной Сибири ($W = 2$ г/см², $\tau_{0,55}^a = 0,15$) значения Q , вычисленные с использованием модели MT_CKD2.4, завышены в зависимости от ξ_0 более чем на 1,5–2 Вт/м² по сравнению с потоками, вычисленными с использованием модели CAVIAR (Continuum Absorption in Visible and Infrared and its Atmospheric Relevance, [36, 37]). Показано также [38], что неучет слабых линий водяного пара в современной версии HITRAN приводит к завышению потоков суммарной радиации, которое в условиях газовой атмосферы (лето умеренных широт, $\xi_0 = 30^\circ$) составляет ~ 2 Вт/м².

3) Выше отмечалось, что расчеты потоков излучения выполнены с представленной в [30] солнечной постоянной, интегральное значение которой равняется $S_{0,3-2,8}^{Kurucz} = 1322,122$ Вт/м². Использование другой солнечной постоянной может привести к небольшому изменению результатов моделирования: в частности, согласно данным [39], $S_{0,3-2,8}^{Gueymard} = 1318,6$ Вт/м². При неучете влияния спектрального хода солнечной постоянной, вычисленные с данными [39] потоки будут занижены на $\sim 0,3\%$ по сравнению с [30].

4) Относительная погрешность расчетов Q методом Монте-Карло составила менее 1%.

5) Погрешности, обусловленные ошибками в задании характеристик атмосферы, получены нами для двух базовых значений АОТ ($\tau_{0,55}^a = 0,05$, $\alpha = 1,3$ и $\tau_{0,55}^a = 0,15$, $\alpha = 1,4$) с использованием для задания аэрозольных характеристик модели OPAC (табл. 3).

По данным солнечных фотометров погрешность определения влагосодержания атмосферы составляет $\Delta_W = 0,1$ г/см², а АОТ – варьирует в диапазоне $\Delta_\tau = 0,01 \div 0,02$ в зависимости от длины волны [40]. Погрешность определения АОР и ФА индикатрисы рассеяния аэрозоля зависит от метода восстановления и степени замутнения атмосферы; согласно [16, 17, 41] мы использовали в расчетах $\Delta_\lambda = 0,05$ и $\Delta_{\langle \mu \rangle} = 0,05$. Помимо учета влияния точности задания ФА, мы оценили, насколько правомерной в расчетах потоков излучения является замена реальных аэрозольных индикатрис рассеяния (эмпирических или рассчитанных по теории Ми) индикатрисой Хенби–Гринштейна при том же значении фактора асимметрии (см. строку «Н–G» в табл. 3).

Таблица 2

**Входные параметры радиационных расчетов, полученные при проведении ЗРЭ 2010–2012 гг.,
и особенности атмосферных ситуаций, зафиксированные оператором (БО – балл облачности)**

Номер ситуации	Дата	Время	ξ_0 , град	АОТ (0,55 мкм)	W, г/см ²	ОСО, е.Д.	α	Первый набор данных			Второй набор данных [13]		Метеорологические особенности
								АОР (0,44/1,02 мкм)	ФА (0,44/1,02 мкм)	Модель	АОР (0,44/1,02 мкм)	ФА (0,44/1,02 мкм)	
1	28.08.10	10:30	57,64	0,029	1,4	290	1,86	0,93/0,88	0,72/0,65	[20]	0,92/0,87	0,7/0,61	Перистые облака в западной части горизонта; БО ~ 1
2	28.08.10	11:30	51,74	0,03	1,4	290	2,01	0,93/0,88	0,72/0,65	[20]	0,92/0,87	0,7/0,61	
3	28.08.10	14:30	48,38	0,037	1,4	290	2,41	0,93/0,88	0,72/0,65	[20]	0,92/0,87	0,7/0,61	
4	28.08.10	16:00	55,55	0,029	1,4	290	2,28	0,93/0,88	0,72/0,65	[20]	0,99/0,99	0,65/0,57	Измерения проводились в отсутствие оператора
5	28.08.10	18:00	70,28	0,033	1,4	290	1,95	0,93/0,88	0,72/0,65	[20]	0,99/0,99	0,64/0,57	
6	31.08.10	09:30	65,69	0,224	2,5	290	1,51	0,93/0,88	0,72/0,64	[15]	0,97/0,96	0,67/0,63	
7	31.08.10	10:30	58,49	0,115	2,4	290	1,57	0,93/0,88	0,72/0,64	[15]	0,97/0,96	0,67/0,63	Измерения проводились в отсутствие оператора
8	31.08.10	11:30	52,67	0,079	2,4	290	1,73	0,93/0,88	0,72/0,64	[15]	0,97/0,96	0,67/0,63	
9	31.08.10	14:30	49,47	0,1	2,5	290	1,77	0,96/0,93	0,67/0,59	[15]	0,95/0,92	0,63/0,58	
10	31.08.10	16:00	56,62	0,08	2,5	290	1,85	0,96/0,93	0,67/0,59	[15]	0,96/0,94	0,67/0,58	Слабая дымка
11	31.08.10	18:00	71,25	0,108	2,4	290	1,39	0,93/0,88	0,69/0,62	[15]	0,93/0,9	0,68/0,61	
12	01.09.10	14:30	49,84	0,153	2,4	290	1,35	0,94/0,92	0,7/0,63	[15]	0,99/0,98	0,65/0,62	
13	01.09.10	16:00	56,98	0,128	2,4	290	1,35	0,94/0,92	0,7/0,63	[15]	0,97/0,97	0,66/0,62	Без особенностей
14	01.09.10	18:00	71,6	0,153	2,5	290	1,35	0,94/0,92	0,7/0,63	[15]	0,96/0,96	0,67/0,63	
15	03.06.11	09:30	53,77	0,148	2,1	290	1,14	0,89/0,87	0,7/0,64	[14]	0,92/0,87	0,71/0,69	
16	03.06.11	10:00	50,05	0,152	2,1	290	1,1	0,88/0,82	0,71/0,66	[14]	0,9/0,83	0,71/0,69	Облака в западной части горизонта; БО ~ 1
17	03.06.11	10:30	46,48	0,155	2,1	290	1,07	0,88/0,82	0,71/0,66	[14]	0,9/0,83	0,71/0,69	Без особенностей
18	12.08.11	18:00	63,26	0,058	1,9	340	1,24	0,81/0,68	0,67/0,55	[13]	0,81/0,68	0,67/0,55	Следы кучевой облачности в восточной части горизонта
19	12.08.11	19:00	74,16	0,051	1,8	340	1,33	0,81/0,63	0,69/0,53	[13]	0,81/0,63	0,69/0,53	
20	09.06.12	18:00	60,07	0,19	2,2	340	1,51	0,98/0,97	0,7/0,62	[15]	0,97/0,95	0,68/0,58	Без особенностей
21	09.06.12	19:00	67,43	0,188	2,2	340	1,57	0,97/0,95	0,71/0,62	[15]	0,95/0,92	0,71/0,58	
22	10.06.12	09:30	53,81	0,176	1,9	340	1,66	0,95/0,91	0,65/0,57	[15]	0,92/0,88	0,69/0,57	Перистые облака в северо-восточной части горизонта; БО ~ 1
23	10.06.12	11:00	43,0	0,16	1,8	340	1,60	0,95/0,91	0,65/0,57	[15]	0,94/0,89	0,68/0,56	
24	10.06.12	16:00	43,2	0,173	1,8	340	1,48	0,94/0,89	0,68/0,61	[15]	0,92/0,86	0,71/0,59	
25	10.06.12	17:00	50,6	0,179	1,9	340	1,47	0,94/0,89	0,68/0,61	[15]	0,92/0,86	0,7/0,58	Без особенностей
26	10.06.12	18:00	60,07	0,177	1,9	340	1,53	0,95/0,92	0,66/0,6	[15]	0,92/0,87	0,71/0,58	
27	10.06.12	19:00	67,43	0,191	1,9	340	1,62	0,96/0,93	0,67/0,58	[15]	0,95/0,92	0,7/0,57	Без особенностей
28	10.06.12	19:30	72,05	0,189	1,9	340	1,66	0,96/0,93	0,67/0,58	[15]	0,95/0,92	0,7/0,57	

Таблица 3

Чувствительность расчетов потоков нисходящей радиации к точности задания входных параметров (базовый расчет выполнен при $\xi_0 = 60^\circ$, $W = 1,8 \text{ г/см}^2$, $\text{ОСО} = 290 \text{ е.д.}$)

Погрешность задания входных параметров	$\tau_{0,55}^a = 0,05$			$\tau_{0,55}^a = 0,15$		
	<i>Прямое излучение</i>					
	Базовый расчет 419,1 Вт/м ²			Базовый расчет 363,7 Вт/м ²		
	$S_{\text{расч}}$, Вт/м ²	$\Delta S_{\text{расч}}$, Вт/м ²	δS , %	$S_{\text{расч}}$, Вт/м ²	$\Delta S_{\text{расч}}$, Вт/м ²	δS , %
$\tau_\lambda^a + 0,015$	407,7	-11,4	-2,7	356,1	-7,6	-2,1
$W + 0,1$	417,7	-1,4	-0,3	362,4	-1,3	-0,4
ОСО + 60	417,7	-1,4	-0,3	362,5	-1,2	-0,3
$\alpha + 0,4$	417,1	-2,0	-0,5	358,5	-5,2	-1,4
	<i>Суммарная радиация</i>					
	Базовый расчет 488,0 Вт/м ²			Базовый расчет 470,4 Вт/м ²		
	$Q_{\text{расч}}$, Вт/м ²	$\Delta Q_{\text{расч}}$, Вт/м ²	δQ , %	$Q_{\text{расч}}$, Вт/м ²	$\Delta Q_{\text{расч}}$, Вт/м ²	δQ , %
$\tau_\lambda^a + 0,015$	484,6	-3,4	-0,7	467,8	-2,6	-0,6
$W + 0,1$	486,5	-1,5	-0,3	469,0	-1,4	-0,3
ОСО + 60	486,2	-1,8	-0,4	468,7	-1,7	-0,4
$\alpha + 0,4$	487,5	-0,5	-0,1	468,8	-1,6	-0,3
$\Lambda_\lambda^a + 0,05$	489,8	1,8	0,4	475,7	5,3	1,1
H-G	487,2	-0,8	-0,2	468,5	-1,9	-0,4
$\langle \mu_\lambda^a \rangle + 0,05$	488,1	0,1	0,02	470,8	0,4	0,1
$A_s + 50\%$	489,2	1,2	0,2	472,0	1,6	0,3
	<i>Диффузная радиация</i>					
	Базовый расчет 68,9 Вт/м ²			Базовый расчет 106,7 Вт/м ²		
	$D_{\text{расч}}$, Вт/м ²	$\Delta D_{\text{расч}}$, Вт/м ²	δD , %	$D_{\text{расч}}$, Вт/м ²	$\Delta D_{\text{расч}}$, Вт/м ²	δD , %
$\tau_\lambda^a + 0,015$	76,9	8,0	11,6	111,7	5,0	4,7
$W + 0,1$	68,8	-0,1	-0,1	106,5	-0,2	-0,2
ОСО + 60	68,5	-0,4	-0,6	106,2	-0,5	-0,5
$\alpha + 0,4$	70,3	1,4	2,0	110,3	3,6	3,4
$\Lambda_\lambda^a + 0,05$	70,7	1,8	2,6	112,0	5,3	5,0
H-G	68,1	-0,8	-1,2	104,8	-1,9	-1,8
$\langle \mu_\lambda^a \rangle + 0,05$	69,0	0,1	0,1	107,1	0,4	0,4
$A_s + 50\%$	70,1	1,2	1,7	108,3	1,6	1,5

В соответствии с результатами численного моделирования, в условиях высокой прозрачности атмосферы наиболее значимое влияние на точность расчетов прямой и диффузной радиации оказывают погрешности определения АОР: при $\Delta_\tau = 0,015$ ошибки $\delta_\tau S$ и $\delta_\tau D$ составляют $\sim 2,7$ и $\sim 11,6\%$ соответственно при зенитном угле Солнца $\xi_0 = 60^\circ$. В характерных летних условиях Сибири ($\tau_{0,55}^a = 0,15$) точность расчетов прямой радиации также определяется Δ_τ ($\delta_\tau S \sim 2,1\%$), однако потоки диффузной радиации наиболее чувствительны к величине альbedo однократного рассеяния аэрозоля: при ошибке в задании АОР, равной 0,05, $\delta_\lambda D$ составляет $\sim 5\%$.

Полученные нами оценки чувствительности к заданию оптической толщи, индикатрисы и альbedo однократного рассеяния аэрозоля, содержания водяного пара и озона, альbedo ПП и т.д. находятся в согласии с данными других авторов (см., например, [2, 4]).

Отметим, что среди перечисленных выше погрешностей к систематическим ошибкам моделирования относятся только те, которые обусловлены использованием различных моделей континуального поглощения, неучетом слабых линий водяного пара, а также данных о солнечной постоянной. В дальнейшем для описания неопределенности вычислений ограничимся рассмотрением погрешностей только в задании характеристик атмосферы:

$$\Delta_{\text{расч}} X = \sqrt{\sum_i (\Delta_i X)^2}, \quad \delta_{\text{расч}} X = (\Delta_{\text{расч}} X) / X,$$

$$X = S, D, Q,$$

где i – i -я характеристика атмосферы.

При $\tau_{0,55}^a = 0,05$ значения $\delta_{\text{расч}} S = 2,7\%$, $\delta_{\text{расч}} Q = 1\%$, $\delta_{\text{расч}} D = 12,2\%$, при $\tau_{0,55}^a = 0,15$ $\delta_{\text{расч}} S = 2,2\%$, $\delta_{\text{расч}} Q = 1,4\%$, $\delta_{\text{расч}} D = 7,7\%$.

3. Сопоставление результатов моделирования и измерений потоков солнечной радиации

Из результатов измерений, выполненных в 2010–2012 гг., было отобрано 28 безоблачных ситуаций, продолжительность которых составляла не менее 1 ч, и измерения потоков, АОТ и влагосодержания выполнялись синхронно. Отсутствие облачности на небосводе контролировалось наблюдателем (см. табл. 2); в качестве косвенного критерия использовался также визуальный анализ временной изменчивости прямой и суммарной радиации (в отсутствие облаков дневной ход потоков солнечного излучения при изменении высоты Солнца имеет «колоколообразный» вид). Данные измерений S и Q усреднялись в течение 5-минутного временного интервала. При расчетах суммарной и диффузной радиации выбирались значения АОП и ФА, полученные в ближайшие – по отношению к радиационным измерениям – моменты времени (разница во времени не превышала в большинстве случаев 30 мин).

При сравнении экспериментальных и расчетных потоков излучения рассматривались абсолютные различия ($\Delta X = X_{\text{расч}} - X_{\text{изм}}$) в сопоставлении с неопределенностью ErX , обусловленной ошибками измерений и расчетов радиации ($ErX = (\Delta_{\text{изм}}^2 X + \Delta_{\text{расч}}^2 X)^{1/2}$), а также относительные различия $\delta X = 100\% \Delta X / X_{\text{изм}}$. При вычислении ErX слагаемое $\Delta_{\text{расч}} X$ рассчитывалось с использованием $\delta_{\text{расч}} X$, полученных для $\tau_{0,55}^a = 0,05$ и $\tau_{0,55}^a = 0,15$ для атмосферных ситуаций, характеризовавшихся значениями $\tau_{0,55}^a < 0,1$ и $\tau_{0,55}^a \geq 0,1$ соответственно.

Прямая радиация. Сопоставление $S_{\text{изм}}$ и $S_{\text{расч}}$ показывает (рис. 1, а), что модельные значения как завышают, так и занижают результаты измерений ($-18 \leq \Delta S \leq 23 \text{ Вт/м}^2$), а величина неопределенности ErS в большинстве ситуаций перекрывает или сопоставима с расхождениями $|\Delta S|$. Принимая во внимание тот факт, что погрешность определения τ_{λ}^a составляет $\sim 0,01-0,02$, различия $|\Delta S|$ при малых значениях АОТ могут сократиться примерно в 2 раза ($\sim 10 \text{ Вт/м}^2$) только за счет точности определения τ_{λ}^a (см. табл. 3). Относительная погрешность расчетов изменяется в диапазоне $-5,5 \leq \delta S \leq 5,1\%$ и по абсолютной величине увеличивается с ростом прозрачности атмосферы: коэффициент корреляции между $|\delta S|$ и $\tau_{0,55}^a$ равен примерно $-0,7$ (рис. 1, б).

Суммарная радиация. При расчетах диффузной и суммарной радиации использовались значения АОП и ФА, полученные на основе одних и тех же фотометрических данных, но с применением разных подходов (см. табл. 2). Из анализа результатов численного моделирования следует, что в отдельных ситуациях в зависимости от соотношения между Λ_{λ}^a и $\langle \mu_{\lambda}^a \rangle$ значения потоков D и Q , рассчитанные с нашими данными [14, 15], были как завышены, так и занижены относительно расчетов на основе [13]. Эти различия по абсолютной величине

не превышали в основном 2 Вт/м^2 , кроме ситуации 6 (см. табл. 2), когда разница в расчетах диффузной и суммарной радиации, обусловленная использованием различных подходов, составила $\sim 4,5 \text{ Вт/м}^2$ (рис. 2, а).

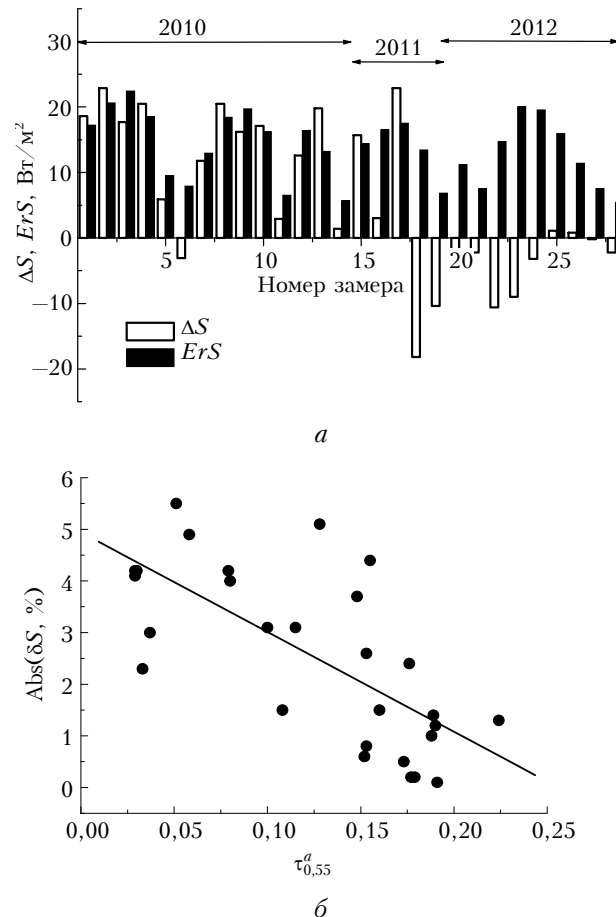
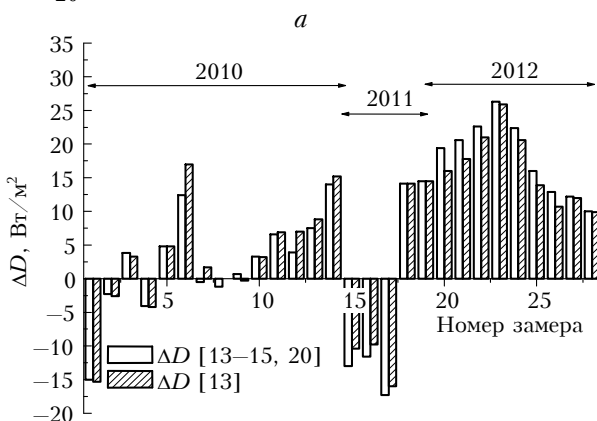
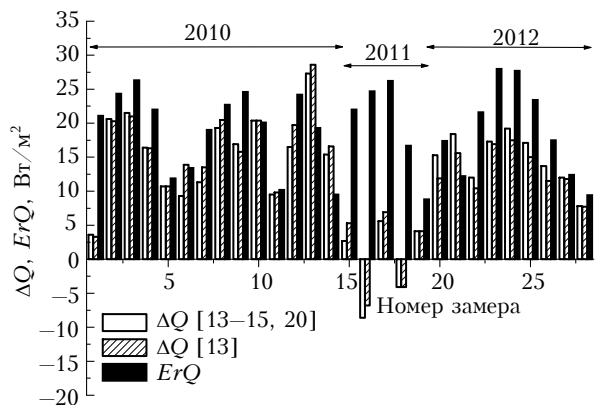


Рис. 1. Неопределенности ΔS , погрешности ErS потоков прямой радиации (а) и зависимость $|\delta S|$ от АОТ (б)

Последнее обусловлено отличиями в АОП и ФА и увеличением чувствительности D и Q к этим характеристикам, которая возрастает с увеличением замутненности атмосферы (в ситуации 6 наблюдалось наибольшее из рассмотренных значение $\tau_{0,55}^a = 0,224$). Диапазоны изменений $\Delta Q(\delta Q)$ составили $-9 \div 27 \text{ Вт/м}^2$ ($-1,4 \div 6\%$) и $-7 \div 29 \text{ Вт/м}^2$ ($-1,1 \div 5,1\%$), согласно данным [14, 15] и [13] соответственно, и в большинстве случаев имело место неравенство $|\Delta Q| \leq ErQ$.

Диффузная радиация. Вопрос о соотношении между $D_{\text{изм}}$ и $D_{\text{расч}}$ был предметом самостоятельных исследований, которые выполнялись в течение нескольких лет различными группами ученых. В частности, в [3, 9] показано, что при непосредственных измерениях диффузной радиации значения $D_{\text{расч}}$ были на 10–20% выше по сравнению с $D_{\text{изм}}$, тогда как результаты [4, 7] свидетельствуют о том, что значения модельных потоков могут быть как завышены, так и занижены относительно измерений.



б

Рис. 2. Неопределенности ΔQ (ΔD) и погрешности ErQ (ErD) потоков суммарной (а) и диффузной (б) радиации

В наших экспериментах диффузная радиация определялась как разность значений Q и S , измеренных пиранометром и пиргелиометром, поэтому корректно оценить различия ΔD в сопоставлении с ErD затруднительно. Отметим лишь, что различия между потоками измеренной и модельной диффузной радиации изменялись в диапазоне $-17 \div 26 \text{ Вт/м}^2$ (рис. 2, б).

В заключение раздела рассмотрим статистические характеристики, которые позволяют оценить в целом абсолютные и относительные различия расчетов и измерений потоков прямой и суммарной радиации (табл. 4).

Таблица 4

Средние значения, моды, медианы и среднеквадратические ошибки различий модельных и измеренных потоков прямой и суммарной радиации

Статистическая характеристика	$\Delta S, \text{ Вт/м}^2$ ($\delta S, \%$)	$\Delta Q, \text{ Вт/м}^2$ ($\delta Q, \%$)
Среднее	6 (1,1)	12,6 (2,8)
Мода	—	17,5 (3)
Медиана	3 (1,15)	14,5 (3)
СКО	13,1 (3)	14,8 (3,3)

Средние значения, моды, медианы и среднеквадратические ошибки (СКО) для двух множеств $\{\Delta_i X\}$ и $\{\delta_i X\}$, $i = 1, \dots, 28$, $X = S, Q$, приведены для первого набора данных [14, 15], поскольку они совпадают с [13] с точностью до $0,5 \text{ Вт/м}^2$.

Распределение отклонений ΔS является двухмодальным: первая мода ($-2,5 \text{ Вт/м}^2$), в основном, обусловлена данными 2011–2012 гг., а вторая ($17,5 \text{ Вт/м}^2$) — данными 2010 г. В целом, расчетные значения потоков прямой радиации по отношению к эмпирическим данным имеют тенденцию к завышению: среднее значение и медиана составляют 1,1 и 1,15% соответственно (табл. 4). Что касается суммарной радиации, то распределение $\{\Delta Q\}$ является одномодальным. Во всех ситуациях, кроме двух (см. рис. 2, а), $Q_{\text{расч}} > Q_{\text{изм}}$, а среднее, мода и медиана относительных отклонений $\{\delta Q\}$ близки и составляют $\sim 3\%$.

4. Обсуждение результатов

Рассмотрим возможные причины того, что расчетные потоки прямой и суммарной радиации в большинстве случаев превышают эмпирические данные (в среднем на ~ 1 и $\sim 3\%$ соответственно).

Систематическое завышение $S_{\text{расч}}$ и $Q_{\text{расч}}$ из-за ошибок моделирования может быть частично обусловлено использованием в расчетах солнечной постоянной [30] и модели континуального поглощения MT_CKD2.4. Следствием перехода к солнечной постоянной [39] будет уменьшение $S_{\text{расч}}$ и $Q_{\text{расч}}$ примерно на $0,3\%$. В соответствии с [35] замена модели MT_CKD на модель CAVIAR приведет к уменьшению радиационных потоков на $0,3\text{--}1,5\%$ при изменении ξ_0 в интервале $35\text{--}85^\circ$ в типичных летних условиях Сибири. В целом, учет указанных причин по нашим оценкам приводит к уменьшению $S_{\text{расч}}$ и $Q_{\text{расч}}$ примерно на $2\text{--}3 \text{ Вт/м}^2$ и вряд ли может существенно уменьшить отклонения ΔS и ΔQ .

Оценить качество восстановления альбедо однократного рассеяния и фактора асимметрии индикатрисы рассеяния излучения аэрозольными частицами методами [13–15] в полной мере не представляется возможным, поскольку прямые измерения диффузной радиации в рамках настоящего исследования не проводились. Тем не менее мы отмечаем хорошее соответствие между собой результатов моделирования $D_{\text{расч}}$ и $Q_{\text{расч}}$, выполненных с использованием подхода Dubovik–King [13] и нашего подхода [14, 15]: в большинстве случаев различие не превышало $\sim 2 \text{ Вт/м}^2$.

Относительно экспериментальных данных следует принять во внимание то обстоятельство, что в настоящей статье рассматривались результаты, полученные в 2010–2012 гг., тогда как калибровка пиранометра и пиргелиометра выполнена в 2011 г. Кроме того, во время экспериментов не всегда отслеживались показания пиранометра, обусловленные «смещением нуля». Однако наибольшее влияние на результаты измерений, на наш взгляд, оказали эффекты «запыления». Именно с этим связан сдвиг центра распределений ΔQ в положительном направлении (см. разд. 1). Что касается отклонений потоков прямого излучения, то полученные в разные годы результаты целесообразно анализировать отдельно.

Как отмечено выше, вторая мода в распределении ΔS ($\sim 17,5$ Вт/м²) определена преимущественно данными, полученными в 2010 г. (см. рис. 1, *a*). Пять из четырнадцати рассмотренных ситуаций характеризовались очень высокой прозрачностью атмосферы ($\tau_{0,55}^a \approx 0,03$). Если такие большие отклонения являются результатом ошибки определения АОТ, то можно ожидать, что значения $S_{\text{расч}}$ уменьшатся на ~ 10 – 12 Вт/м² (см. табл. 3) и не компенсируют положительного сдвига отклонений ΔS . Поэтому можно предположить, что эффекты «запыления» в 2010 г. имели место и для пиргелиометра. Вторая мода в распределении ΔS (2012 г.) отрицательна; небольшой сдвиг может быть связан с «запылением» солнечного фотометра.

Таким образом, результаты сопоставления потоков излучения свидетельствуют о том, что их различия в большинстве случаев меньше или сопоставимы с величиной неопределенности, обусловленной ошибками во входных параметрах и измерениях. Проведенный анализ показывает также, что средние различия эмпирических данных и модельных расчетов близки к результатам, полученным другими авторами и в других регионах. Важно, что представляемые результаты получены в условиях высокой или умеренной прозрачности атмосферы, когда существенно возрастают погрешности определения оптической толщи, индикатрисы и альbedo однократного рассеяния аэрозоля. Это свидетельствует о том, что используемые нами модели и методы, предназначенные для восстановления оптических характеристик аэрозоля, позволяют в целом адекватно описывать его радиационные эффекты с учетом климатических условий Западной Сибири.

Работа выполнена при частичной поддержке Соглашения № 8325, РФФИ (проект № 12-05-31007), Отделения наук о Земле РАН (проект 12.2).

1. Kato S., Ackerman T.P., Clothiaux E.E., Mather J.H., Mace G.G., Wesely M.L., Murcray F., Michalsky J. Uncertainties in modeled and measured clear-sky surface shortwave irradiances // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102, N 22. P. 25,881–25,898, doi:10,1029/97JD01841.
2. Halthore R.N., Schwartz S.E., Michalsky J.J., Anderson G.P., Ferrare R.A., Holben B.N., Brink H.M.T. Comparison of model estimated and measured direct-normal solar irradiance // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102, N 25. P. 29,991–30,002, doi:10,1029/97JD02628.
3. Halthore R.N., Schwartz S.E. Comparison of model estimated and measured diffuse downward irradiance at surface in cloud-free skies // *J. Geophys. Res. D.* 2000. V. 105, N 15. P. 20,165–20,177, doi:10,1029/2000JD900224.
4. Henzing J.S., Knap W. H., Stammes P., Apituley A., Bergwerff J.B., Swart D.P.J., Kos G.P.A., ten Brink H.M. Effect of aerosols on the downward shortwave irradiances at the surface: Measurements versus calculations with MODTRAN4.1 // *J. Geophys. Res. D.* 2004. V. 109, N 14, doi:10,1029/2003JD004142.
5. Michalsky J.J., Anderson G.P., Barnard J., Delamere J., Gueymard C., Kato S., Kiedron P., McComiskey A., Ricchiuzzi P. Shortwave radiative closure studies for clear skies during the Atmospheric Radiation Measurement 2003 Aerosol Intensive Observation Period // *J. Geophys. Res. D.* 2006. V. 111, N 14, doi:10,1029/2005JD006341.

6. Nowak D., Vuilleumier L., Long C.N., Ohmura A. Solar irradiance computations compared with observations at the Baseline Surface Radiation Network Payerne site // *J. Geophys. Res. D.* 2008. V. 113, N 14, doi:10,1029/2007JD009441.
7. Wang P., Knap W.H., Munneke P.K., Stammes P. Clear-sky shortwave radiative closure for the Cabauw Baseline Surface Radiation Network site, Netherlands // *J. Geophys. Res. D.* 2009. V. 114, N 14, doi:10,1029/2009JD011978.
8. Halthore R.N., Nemesure S., Schwartz S.E., Emre D.G., Berk A., Dutton E.G., Bergin M.H. Models overestimate diffuse clear-sky irradiance: A case for excess atmospheric absorption // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25, N 19. P. 3591–3594.
9. Halthore R.N., Miller M.A., Ogren J.A., Sheridan P.J., Slater D.W., Stoffel T. Further developments in closure experiments for diffuse irradiance under cloud-free skies at a continental site // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, N 7, doi:10,1029/2003GL019102.
10. Плахина И.Н., Репина И.А., Горчакова И.А. Сопоставление измеренных и рассчитанных потоков радиации приходящих к поверхности Земли // *Изв. АН. Физ. атмосфер. и океана.* 1998. Т. 34, № 1. С. 125–133.
11. Чубарова Н.Е., Рублев А.Н., Троценко А.Н., Трёмбач В.В. Вычисление потоков солнечного излучения и сравнение с результатами наземных измерений в безоблачной атмосфере // *Изв. АН. Физ. атмосфер. и океана.* 1999. Т. 35, № 2. С. 222–239.
12. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakadjima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sens. Environ.* 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.
13. Dubovik O., King M. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res. D.* 2000. V. 105, N 16. P. 20673–20696.
14. Бедарева Т.В., Журавлева Т.Б. Восстановление индикатрисы и альbedo однократного рассеяния аэрозоля по данным радиационных измерений в альмукантарате Солнца: численное моделирование // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 2. С. 128–138.
15. Бедарева Т.В., Свириденков М.А., Журавлева Т.Б. Восстановление оптических и микрофизических характеристик аэрозоля по данным наземных спектральных измерений прямой и рассеянной солнечной радиации. Часть 1. Тестирование алгоритма // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 7. С. 602–612.
16. Бедарева Т.В., Журавлева Т.Б. Оценка аэрозольного поглощения по данным солнечной фотометрии в летних условиях Западной Сибири // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 12. С. 1023–1030.
17. Бедарева Т.В., Свириденков М.А., Журавлева Т.Б. Восстановление оптических и микрофизических характеристик аэрозоля по данным наземных спектральных измерений прямой и рассеянной солнечной радиации. Часть 2. Апробация алгоритма // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 9. С. 768–777.
18. Panchenko M.V., Zhuravleva T.B., Terpugova S.A., Polkin V.V., Kozlov V.S. An empirical model of optical and radiative characteristics of the tropospheric aerosol over West Siberia in summer // *Atmos. Meas. Technol.* 2012. V. 5, N 7. P. 1513–1527.
19. Панченко М.В., Козлов В.С., Полькин В.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Восстановление оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие

- и гигроскопические свойства частиц // Оптика атмосф. и океана 2012. Т. 25, № 1. С. 46–54.
20. Hess M., Koepke P., Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79, N 5. P. 831–844.
 21. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. World Climate Research Programme. WCP-112. WMO/TD N 24. 1986. 60 p.
 22. Чеснокова Т.Ю., Журавлева Т.Б., Воронина Ю.В., Скляднева Т.К., Ломакина Н.Я., Ченцов А.В. Моделирование потоков солнечного излучения с использованием высотных профилей концентрации водяного пара, характерных для условий Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 969–975.
 23. Комаров В.С., Ломакина Н.Я. Статистические модели пограничного слоя атмосферы Западной Сибири. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2008. 222 с.
 24. Ломакина Н.Я., Комаров В.С., Ильин С.Н. Статистические модели высотного распределения температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Восточной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 629–632.
 25. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуие Г., Максюттов Ш., Махида Т., Фофонов А.В. Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 5. С. 457–464.
 26. Anderson G., Clough S., Kneizys F., Chetwynd J., Shettle E. AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km), Air Force Geophysics Laboratory // AFGL-TR-86-0110. 1986. Environm. Res. Paper. N 954.
 27. Moody E.G., King M.D., Platnik S., Schaaf C.B., Gao F. Spatially compete global spectral surface albedos: value-added datasets derived from Terra MODIS Land products // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2005. V. 43, N 1. P. 144–158.
 28. Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Фирсов К.М. Моделирование прямого радиационного форсинга для типичных летних условий Сибири. Часть 1: Метод расчета и выбор входных параметров // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 2. С. 163–172.
 29. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.-P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacome N., Lafferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Simecková M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Vander Auwera J. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2009. V. 110, N 9–10. P. 533–572.
 30. Fontenla J., White O.R., Fox P.A., Avert E.H., Kurucz R.L. Calculation of solar irradiances. I. Synthesis of the solar spectrum // Astrophys. J. 1999. V. 518. P. 480–500.
 31. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. Спектральная зависимость аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра 0,34–4 мкм // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 2. С. 156–164.
 32. Журавлева Т.Б., Панченко М.В. Моделирование приходящей солнечной радиации с использованием эмпирической модели вертикальных профилей оптических характеристик аэрозоля для летнего сезона Западной Сибири // Аэрозоли Сибири. XVII Рабочая группа: Тезисы докл. Томск: Изд-е ИОА СО РАН, 2010. С. 62.
 33. Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю. Новый метод учета перекрывания полос поглощения атмосферных газов при параметризации уравнения переноса // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11, N 4. С. 410–415.
 34. Чеснокова Т.Ю., Фирсов К.М., Воронина Ю.В. Применение рядов экспонент при моделировании широкополосных потоков солнечного излучения в атмосфере Земли // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 9. С. 799–804.
 35. Чеснокова Т.Ю., Журавлева Т.Б., Пташник И.В., Ченцов А.В. Моделирование потоков солнечного излучения в атмосфере с использованием различных моделей континуального поглощения водяного пара в типичных условиях Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 2. С. 100–107.
 36. Ptashnik I.V., McPheat R.A., Shine K.P., Smith K.P., Williams R.G. Water vapor self-continuum absorption in near-infrared windows derived from laboratory measurements // J. Geophys. Res. D. 2011. V. 116, N 16. P. 1–16.
 37. Ptashnik I.V., McPheat R.A., Shine K.P., Smith K.M., Williams R.G. Water vapour foreign continuum absorption in near-infrared windows from laboratory measurements // Phil. Trans. Roy. Soc. 2012. V. 370. P. 2557–2577.
 38. Пташник И.В., Shine K.P. Влияние обновления спектроскопической информации на расчет потоков солнечной радиации в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 3. С. 276–281.
 39. Gueymard C.A. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models // Sol. Energy. 2004. V. 76, N 4. P. 423–453.
 40. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России // Под общей ред. С.М. Сакерина. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 484 с.
 41. Журавлева Т.Б., Сакерин С.М. Моделирование прямого радиационного форсинга аэрозоля для типичных летних условий Сибири. Часть 2: Диапазон изменчивости и чувствительность к входным параметрам // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 2. С. 173–182.

T.B. Zhuravleva, S.M. Sakerin, T.V. Bedareva, D.M. Kabanov, I.M. Nasrtdinov, T.Yu. Chesnokova.
Solar radiation fluxes in the clear atmosphere of Western Siberia: a comparison of calculations with measurements.

A comparison of calculation and measurement results of downward solar radiation fluxes at the Earth's surface, made in the cloudless atmosphere in summer of 2010–2012, in the background area of the boreal zone of Siberia (Tomsk) is presented. The comparison is made taking into account instrumental accuracy and errors in determining the atmospheric characteristics. To set the aerosol optical characteristics, ground-based photometric measurements data, obtained at the Tomsk site of AERONET network were used. It is shown that the relative differences in the simulated and experimental values of the fluxes of direct and total radiation is on average less than 1% and 3%, respectively.