

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.521.3

К.М. Фирсов, Ю.В. Воронина, Д.М. Кабанов, С.М. Сакерин

Определение общего содержания паров воды по измерениям солнечного фотометра

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 6.07.2005 г.

Разработана методика восстановления общего содержания паров воды из измерений прямой солнечной радиации солнечным фотометром SP-4m. Сделаны оценки влияния спектроскопических погрешностей на точность восстановления общего содержания паров воды. Обсуждаются различные методы обработки данных наблюдений. Результаты восстановления общего содержания H_2O сопоставлены с данными фотометра CE-318, работающего в ИОА СО РАН в составе сети AERONET.

Введение

Водяной пар — важнейшая газовая составляющая, определяющая перенос радиации и участвующая в процессе формирования погоды и климата на Земле. Поэтому огромное внимание уделяется разработке новых и совершенствованию известных методов определения влажности в атмосфере. Оптические методы обладают большими преимуществами в сравнении с контактными методами метеорологического зондирования, это — оперативность, возможность измерения интегральных характеристик, сравнительно низкая стоимость приборов и т.д. Начиная с работ [1, 2, 11], многие исследователи для определения общего содержания (ОС) водяного пара используют измерения прямой солнечной радиации в полосах поглощения водяного пара.

Как правило, чтобы получить функциональную зависимость пропускания атмосферы, обусловленного молекулярным поглощением от ОС H_2O , привлекают модели полос. Известно несколько модификаций таких аппроксимаций. В работе [3] использовалась одна из модификаций модели Гуди в виде зависимости функции пропускания как квадратного корня из общего содержания водяного пара. Для расчета функции пропускания применялся пакет программ LOWTRAN.

В работе [4] область изменения поглощающей массы подразделялась на три интервала: 0,4–1, 1–3, 3–6,1 г/см². Для первого интервала функция пропускания зависит от поглощающей массы в степени 0,9, для второго — в степени 0,75 и для последнего — в степени 0,5. Расчет функций пропускания проводился на основе пакета программ LOWTRAN.

Согласно оценкам, приведенным в [5], подобная методика может быть использована для восстановления общего содержания водяного пара с погрешностью, не превышающей 10% в сравнении с данными радиозондирования. Основной недостаток модельных представлений полос поглощения это то, что они дают некоторое идеализированное описание спектра

поглощения и, как следствие, могут приводить к погрешностям. По нашим оценкам, подобные модели могут давать различный дневной ход ОС H_2O . Прямые методы расчета *line-by-line* характеристик молекулярного поглощения в настоящее время обеспечивают более высокую точность. Это подтверждается результатами работы [6] по измерению прямой солнечной радиации Фурье-спектрометром в спектральном диапазоне 0,77–1,10 мкм и в работе [7] в области 0,55–0,71 мкм.

Процедура калибровки фотометра осуществляется, как правило, обычно долгим методом Бугера, который предполагает, что состояние атмосферы в течение процесса измерения стабильно. Для нахождения константы калибровки обычно применяют стандартный метод наименьших квадратов [12], который предполагает, что случайная погрешность есть только у измеряемой величины и она является нормально распределенной, а погрешности в факторах (аргументах функции, которую минимизируют) отсутствуют. Нарушение этих условий может приводить к смещенным оценкам в константе калибровки и ОС H_2O .

Регистрируемый сигнал солнечного фотометра зависит не только от концентрации поглощающих газов, но и от распределения температуры, давления вдоль трассы луча, наличия облачности, аэрозоля и т.п. Так, например, в [12] отмечалось, что при использовании спектральных каналов с центрами 0,87 и 0,94 мкм возможны заметные погрешности в определении ОС H_2O . В связи с вышесказанным необходима такая процедура калибровки, которая позволила бы минимизировать возникающие погрешности, в том числе и погрешности, обусловленные параметризацией функций пропускания.

Цель данной работы заключалась в усовершенствовании методики восстановления ОС H_2O из измерений солнечных фотометров, разрабатываемых в Институте оптики атмосферы СО РАН. Для реализации этого необходимо было получить функциональную зависимость пропускания атмосферы в каналах фотометра от поглощающей массы водяного

пара, разработать методику определения константы калибровки, оценить погрешности восстановления ОС H₂O, обусловленные вариациями вертикальных профилей температуры и приземного давления, погрешностями параметров спектральных линий, погрешностями задания аппаратной функции и т.п.

Описание солнечного фотометра

Солнечные фотометры (SP-4m, SP-6) детально описаны в работах [8, 9], поэтому ограничимся лишь их краткой характеристикой.

Фотометры состоят из двух отдельных частей, соединенных кабелем. Оптико-электронный блок на двухкоординатном (азимут/зенит) поворотном столе устанавливается снаружи. В помещении располагаются блок питания и дистанционного управления, компьютер. Оптико-электронный блок SP-4m включает в себя два измерительных канала: коротковолновый (КВ) и длинноволновый (ДВ). В фотометре SP-6 добавлен ультрафиолетовый канал (0,306–0,37 мкм). В состав измерительных комплексов входит также датчик освещенности (обычный фотодиод с рассеивающей насадкой), используемый для автоматического включения системы наведения фотометра на Солнце, когда оно не перекрыто облаками.

Основные технические характеристики фотометра SP-4m, данные измерений которого использовались в представляемых здесь результатах, приведены в таблице.

Методика расчета и параметризации функций пропускания атмосферы для солнечного фотометра SP-4m

Для решения обратной задачи восстановления общего содержания газа из измерений прямого солнечного излучения фотометром SP-4m необходима

функциональная зависимость пропускания от поглощающей массы газа. Были проведены расчеты функций пропускания прямым методом для различных зенитных углов Солнца и различных метеорологических ситуаций, реализующихся в Западной Сибири. В результате моделирования было выявлено, что функция пропускания в спектральном диапазоне вблизи 0,94 и 0,87 мкм определяется зависимостью от поглощающей массы паров воды и практически не зависит от вариаций температуры и давления воздуха [14]. Наши оценки показали, что погрешность оптической толщи, обусловленной вариациями метеопараметров $\Delta\tau/\tau \sim 1\%$ (где $\tau = -\ln(T_{0,94}/T_{0,87})$, $T_{0,94}$, $T_{0,87}$ – пропускание атмосферы в спектральных каналах 0,94 и 0,87 мкм соответственно). Этот факт дал возможность разработать быструю методику расчета функций пропускания [14]. Методика основывается на архиве узкополосных функций пропускания атмосферы со спектральным разрешением 5 см^{-1} , рассчитанных прямым методом с использованием базы параметров спектральных линий HITRAN-2000 (<http://www.hitran.com>) и современных моделей непрерывного поглощения (http://rtweb.aer.com/continuum_code.html) для различных зенитных углов Солнца и четырех сезонов (зима полярных широт, зима и лето умеренных широт и тропики) метеомодели AFGL. Начальная высота при расчете функции пропускания задавалась равной 120 м – это высота г. Томска над уровнем моря. Спектральное разрешение 5 см^{-1} было выбрано таким, чтобы оно было много меньше спектральной ширины аппаратной функции. Расчет функции пропускания для заданного спектрального канала (в диапазоне длин волн $\lambda_1 - \lambda_2$) солнечного фотометра осуществлялся следующим образом:

$$T(\theta, \{W_{ij}\}_{i=1}^6) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) I_0(\lambda) \prod_{i=1}^6 T_0(\lambda, \theta, W_i) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) I_0(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

Характеристики солнечного фотометра SP-4m [8]

Характеристика	КВ-канал	ДВ-канал
Центральный угол поля зрения, град	1,38	1,48
Количество длин волн	10	4
Максимумы полос пропускания светофильтров, мкм	0,371; 0,408; 0,438; 0,475; 0,500; 0,547; 0,675; 0,871; 0,938; 1,052	1,246; 1,557; 2,20; 3,97
Полуширина пропускания светофильтров, нм	5–12	15–40
Тип фотоприемника	ФД-24к	МГ-32
Погрешность фотометрирования, %	0,3	0,7
Погрешность слежения за Солнцем, град		0,2
Время измерения «спектра» (1 об. барабана), с		5
Диапазон углов наведения (зенит × азимут), град		90×300
Температура термостата, °С		32 ± 0,3
Диапазон окружающих температур, °С		–50 ÷ 35
Общая масса фотометра (оценка), кг		30
Измеряемые характеристики (диапазон/погрешность):		
аэрозольная оптическая толщина;		0–1/0,01
влажностное содержание атмосферы, г/см ² ;		0–6/0,07
прямая, суммарная, рассеянная радиация, Вт/м ²		0–1500/6%

где $T_0(\lambda, \theta, W_i)$ – значение узкополосной функции пропускания, взятой из архива с длиной волны λ , зенитным углом Солнца θ и поглощающей массой i -го газа W_i (всего учитывалось шесть газов); $F(\lambda)$ – аппаратная функция рассматриваемого спектрального канала солнечного фотометра; $I_0(\lambda)$ – солнечная постоянная. В формуле (1) при расчете функций пропускания использовалось приближение произведения функций пропускания, которое при среднем спектральном разрешении дает хорошие результаты, а при усреднении по спектру, которое выполняется в формуле (1), погрешность этого приближения еще уменьшается и ее величина становится менее 1% в силу того, что эти погрешности имеют осциллирующий характер.

В связи с тем что появилась новая версия базы данных HITRAN-2004 [16], для этих двух рассматриваемых спектральных каналов были проведены тестовые расчеты, которые показали, что пропускания, рассчитанные с новой версией базы данных и версией 2000 г., практически не различимы. Поэтому архив узкополосных функций не пересчитывался. Однако для оценки погрешности расчета функций пропускания использовался HITRAN-2004, в котором приведены более адекватные данные о погрешностях спектральных линий. Для того чтобы сделать такие оценки, проводился расчет функций пропускания с теми интенсивностями и полуширинами линий, которые заданы в базе данных. Затем для каждой спектральной линии интенсивность увеличивалась на величину погрешности и снова проводился расчет. Аналогичный расчет проводился и для полуширин. В итоге была получена оценка спектроскопической погрешности $\Delta\tau/\tau \sim 2-3\%$. Следует заметить, что полученная оценка завышена. Это обусловлено тем, что все интенсивности линий одновременно завышались, т.е. такая погрешность является систематической. Другой крайний случай – когда все погрешности случайные. В [15] показано, что в этой ситуации для функции пропускания с разрешением ниже 5 см^{-1} такие погрешности пренебрежимо малы.

При расчете функции пропускания необходимо было учитывать спектральную зависимость аппаратной функции, которая являлась сверткой спектральных зависимостей пропускания интерференционного фильтра, чувствительности приемника и пропускания входного окна солнечного фотометра. Данные спектральные зависимости входного окна и светофильтра экспериментально прописывались на спектрометре СФ-46, погрешность которого в определении длины волны составляет не более 0,5 нм, а измерения пропускания – не более 1%.

Таким образом, погрешности расчета функции пропускания в каналах фотометра, используемых для зондирования общего содержания водяного пара (область 0,94 и 0,87 мкм), обусловлены:

- 1) спектроскопической погрешностью $\Delta\tau/\tau \sim 2-3\%$,
- 2) погрешностью, обусловленной вариациями метеопараметров $\Delta\tau/\tau \sim 1\%$,
- 3) погрешностью спектрального пропускания светофильтра $\Delta T \sim 1\%$.

Если полагать, что эти погрешности некоррелированы, то суммарная погрешность в τ не превышает 3–4%.

Для решения обратной задачи восстановления ОС H_2O и калибровки фотометра необходимо было получить параметрическую зависимость функции пропускания от поглощающей массы. Один из наиболее популярных способов – это использование моделей полос, когда отношение пропускания в каналах фотометра аппроксимируется следующим выражением:

$$T_{0,94}/T_{0,87} = e^{-(\alpha+\beta(mW_0)^n)}, \quad (2)$$

где W_0 – поглощающая масса вертикального столба атмосферы (ос.см); m – оптическая масса, которая для малых зенитных углов θ выражается формулой $m = 1/\cos\theta$; n , α , β – параметры модели, которые определяются путем подгонки к расчетной функции пропускания. Формулы, подобные (2), удобны тем, что при процедуре калибровки применима линейная регрессия. Для случая $n = 0,5$ методом линейной регрессии были определены параметры модели $\alpha = 0,01634 \pm 0,00606$, $\beta = 0,47626 \pm 0,00241$.

На рис. 1 приведены результаты расчета *line-by-line* и по формуле (2), из которых следует, что погрешность аппроксимации при средних и больших поглощающих массах достигает 5%, а при малых может достигать 10%. А поскольку оптическая толщина и поглощающая масса связаны через корень квадратный, то погрешность восстановления ОС будет достигать соответственно 10 и 20% только за счет параметризации.

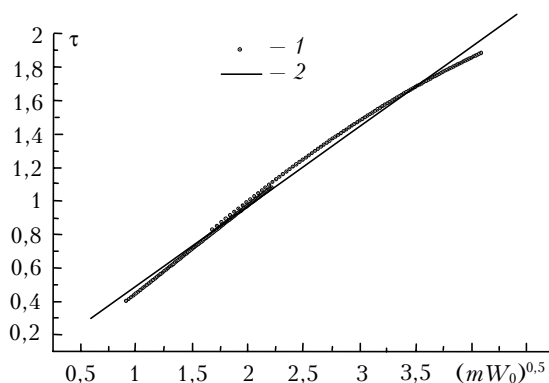


Рис. 1. Зависимость оптической толщины от ОС H_2O в атмосфере Земли: 1 – функции пропускания рассчитаны на основе быстрого метода для условий лето и зима средних широт (метеомодель AFGL [10], для зимних условий $W_0 = 0,82$ ос.см, для летних $W_0 = 2,81$ ос.см, величина m менялась от 1 до 5,85); 2 – аппроксимация τ по формуле (2)

Ясно, что такой способ аппроксимации не является удачным. Другие способы аппроксимации, когда параметр α полагался равным нулю, а параметры n и β варьировались, также не привели к успеху.

Проведенное нами моделирование показало, что аппроксимация (2) корректна, если параметр n сделать зависимым от поглощающей массы W , т.е. если

оптическую толщину аппроксимировать выражением $\tau = \beta W^n$, где n – переменная. Значение n легко определить по формуле $n = d(\ln \tau) / (dW)$. На рис. 2 приведена зависимость параметра n от W . Из рис. 2 видно, что n для летних и зимних условий модели AFGl меняется в пределах от 0,35 до 0,6. Если провести расчеты для полярных и тропических широт, то эти пределы еще возрастут. Из вышесказанного становятся ясными причины не очень удачной аппроксимации типа (2).

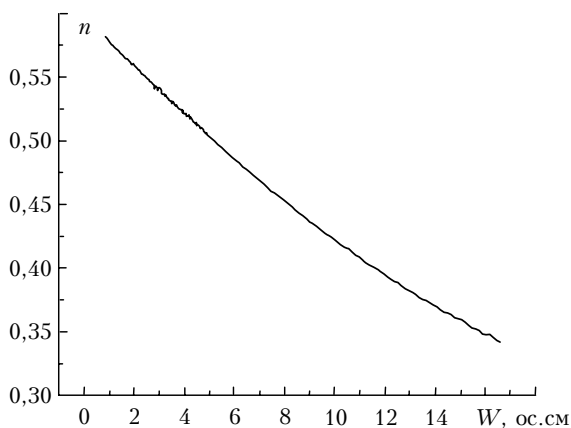


Рис. 2. Зависимость n от W

Поэтому было принято решение использовать неявную зависимость τ от $W = mW_0$, хотя это несколько усложняет процедуру калибровки, так как линейная регрессия становится неприменимой.

Калибровка фотометра SP-4m и восстановление общего содержания водяного пара в атмосфере

Для определения константы калибровки осуществлялась минимизация следующего функционала:

$$\sum_i (m_i W_0 - \tau^{-1}(\ln(S_{0,94}/S_{0,87}))_i - \ln C)^2 w_i \rightarrow \min, \quad (3)$$

где i – номер наблюдения; w_i – весовая функция.

Данный функционал был получен из следующих соображений. Отношение сигналов $S_{0,94}$, $S_{0,87}$ в пренебрежении молекулярным и аэрозольным рассеянием в двух каналах фотометра на длинах волн 0,94 и 0,87 мкм определяется формулой

$$S_{0,94}/S_{0,87} = C \exp[-\tau(mW_0)]. \quad (4)$$

Тогда

$$mW_0 = \tau^{-1}(\ln(S_{0,94}/S_{0,87}) - \ln C). \quad (5)$$

Здесь τ^{-1} – функция, обратная к τ .

В качестве весовой функции мы использовали $w = 1/\tau^2$.

Такой вид функционала позволил избежать большинства проблем, которые возникают при использовании линейной регрессии:

1) использование неявного вида функции $\tau(W)$ исключило погрешности, связанные с параметризацией функции пропускания;

2) погрешности в факторах сведены к минимуму, так как погрешность в сигналах мала;

3) введение весовой функции позволило снизить вес погрешностей, возникающих при больших зенитных углах.

Осталась только одна проблема, связанная с тем, что W_0 – нестационарная величина, которая может заметно меняться в течение дня. Известно [13], что в летних условиях влагосодержание в атмосфере имеет распределение, близкое к логнормальному. Кроме того, может наблюдаться дневной ход W_0 . Поэтому для оценки влияния этих факторов на константу калибровки C было проведено численное моделирование, для чего закладывался линейный тренд в виде $W_0 = W_{00} + k(m - m_0)$, а W_{00} варьировалась с помощью датчика случайных чисел как логнормальная величина. На основе анализа данных AERONET об ОС H_2O для моделирования были использованы следующие значения параметров: $W_{00} = 1,8$, коэффициент вариации величины W_{00} составлял 0; 3; 5%, $m_0 = 1,2$, т.е. m изменялось в интервале 1,2–5,7, что соответствовало диапазону измерений фотометра, а k принимало значения $\pm 0,02$; $\pm 0,03$; $\pm 0,04$.

В результате моделирования было выявлено, что с возрастанием тренда (коэффициент k – положительный) наблюдался рост константы калибровки (до 5–6%), а при убывании тренда константа уменьшалась примерно на такую же величину. Введение случайной составляющей, логнормально распределенной с коэффициентом вариации 5%, не привело к заметным изменениям в константе калибровки, погрешность не превышала 1%.

Для калибровки фотометра использовались измерения, проводимые 4.07.2003 г. с 6:00 до 16:00 ч и 28.08.2004 г. с 6:00 до 13:00. Использование формулы (3) дало константу калибровки $C = 1,37$. Общее содержание водяного пара восстанавливалось прямым методом с учетом и без учета молекулярного рассеяния по формуле

$$W = \frac{1}{m} \left[\frac{\ln \left(C \frac{S_{0,94}}{S_{0,87}} \right) + m \Delta \tau}{\beta} \right]^{\frac{1}{n}},$$

где $\Delta \tau$ определяло вклад молекулярного и аэрозольного рассеяния. Отношение пропускания на двух длинах волн дает не скомпенсированную величину молекулярного рассеяния: $\tau_{0,94} - \tau_{0,87} = -0,005m$ (при $\Delta \tau = 0$ молекулярное рассеяние не учитывалось).

Моделирование показало, что восстановленное значение ОС H_2O незначительно меняется при учете молекулярного рассеяния (рис. 3, 4). Зависимость аэрозольного ослабления от длины волны можно аппроксимировать формулой Ангстрема $\tau \sim \lambda^{-\delta}$, где δ – параметр Ангстрема, типичные значения которого лежат в интервале 0,5–1,5. При максимальном зна-

чении этого параметра будет наблюдаться максимальная погрешность $\tau_{0,94} - \tau_{0,87} = -0,11\tau_{0,87}m$. Задавая типичное значение аэрозольной оптической толщины на длине волны 0,87 мкм равным 0,03 [5], легко получить оценку $\tau_{0,94} - \tau_{0,87} = -0,003m$. Эта величина в 1,5 раза меньше, чем вклад молекулярного рассеяния. Поэтому на данном этапе аэрозольное рассеяние не учитывалось. Тем не менее в дальнейшем предполагается его учет на основе измерений в спектральных каналах в области 0,53 и 1,06 мкм.

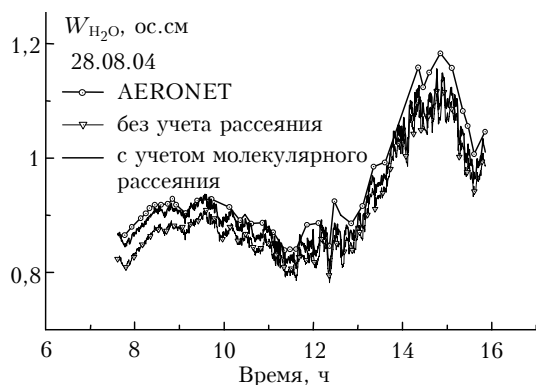


Рис. 3. Результаты восстановления общего содержания водяного пара в вертикальном столбе атмосферы с использованием солнечного фотометра SP-4m и фотометра CE-318 сети AERONET (2004 г.)

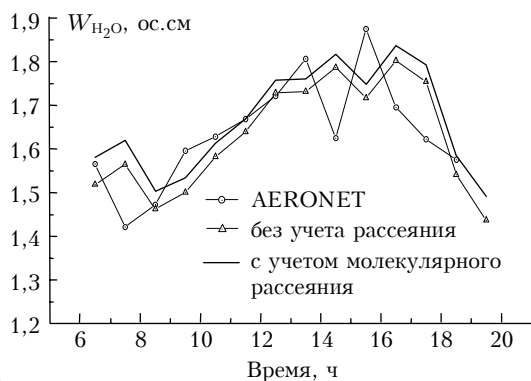


Рис. 4. Сравнение средней за август 2004 г. поглощающей массы водяного пара, восстановленной прямым методом с данными AERONET

Результаты восстановления общего содержания водяного пара приведены на рис. 3. На рис. 4 приведено сравнение средней за август 2004 г. поглощающей массы водяного пара с данными AERONET (<http://www.aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Из рис. 3 видно, что при малых зенитных углах значение W_{H_2O} достаточно хорошо соответствует данным сети AERONET. Однако при больших зенитных углах наблюдается различие, причем с увеличением зенитного угла оно растет.

И в заключение, для того чтобы продемонстрировать ограниченность моделей полос, было проведено сопоставление ОС паров воды, восстановленных по методике, описанной в данной статье, и при использовании аппроксимации функции пропускания вида (2). Результаты, представленные на рис. 5,

демонстрируют, что с ростом зенитного угла Солнца формула (2) приводит к завышению ОС.

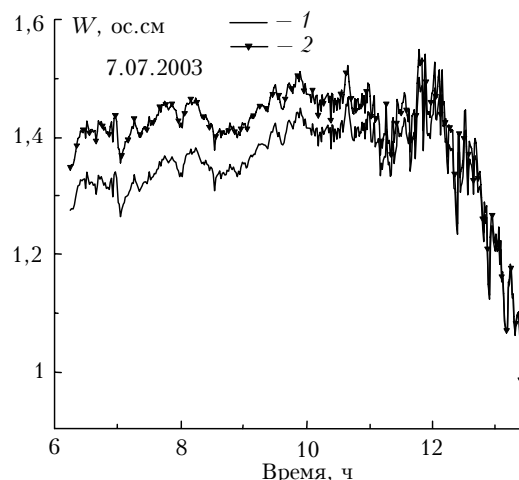


Рис. 5. Сравнение общего содержания водяного пара, восстановленного из данных SP-4m при использовании разных методик решения обратной задачи: 1 – неявная зависимость пропускания от поглощающей массы; 2 – общепринятый метод параметризации функции пропускания вида $T = \exp(-(\alpha + \beta W^{0.5}))$

Заключение

1. Проведенный нами анализ показал, что база данных HITRAN дает возможность с высокой точностью рассчитать функциональную зависимость пропускания от поглощающей массы. Оценки показали, что типичная погрешность модели составляет величину, не превышающую $\sim (2-3)\%$ оптической толщины, что приводит к погрешности в общем содержании воды не более 5%.

2. Показано, что вариации метеопараметров (температура и давление) для летних и зимних условий не приводят к большой изменчивости функций пропускания атмосферы.

3. Использование неявной зависимости функции пропускания от общего содержания паров воды позволяет упростить процедуру калибровки и избежать погрешностей, связанных с параметризацией функций пропускания.

4. Сопоставление восстановленного значения водяного пара находится в хорошем согласии с данными AERONET.

Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта РФФИ № 04-07-90123 и частичной поддержке гранта ведущей научной школы РФ № НШ.373.2003.5.

1. Fowle F.E. The spectroscopic determination of aqueous vapor // *Astrophys. J.* 1912. V. 35. P. 149–162.
2. Fowle F.E. The transparency of aqueous vapor // *Astrophys. J.* 1915. V. 42. P. 394–411.
3. Gates D.M., Harrop W.J. Infrared transmission of the atmosphere to solar radiation // *Appl. Opt.* 1963. V. 2. P. 887–898.
4. Tomasi C., Vitale V., Tagliuzucca M., Gasperoni L. Infrared hygrometry measurements at Terra Nova Bay //

- Proc. Conf. «Italian Research on Antarctic Atmosphere». 1990. V. 27. P. 187–200.
5. *Reagan J.A., FELLOW, Thome K.J., Herman B.M.* A simple instrument and technique for measuring columnar water vapor via near-IR differential solar transmission measurements // IEEE trans. Geosci. and Remote Sens. 1992. V. 30. N 4. P. 825–831.
 6. *Albert P., Smith K.M., Bennartz R., Newnham D.A., Fischer J.* Satellite- and ground-based observations of atmospheric water vapor absorption in the 940 nm region // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2004. V. 84. N 2. P. 181–193.
 7. *Coheur P.F., Clerbaux C., Carleer M., Fally S., Hurtmans D., Colin R., Hermans C., Vandaele A.C., Barret B., De Maziere M., De Backer H.* Retrieval of atmospheric water vapor columns from FT visible solar absorption spectra and evaluation of spectroscopic databases // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2003. V. 82. N 1–4. P. 133–150.
 8. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А.* Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1162–1169.
 9. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С.* Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонент атмосферы. Ч. 1. Солнечные фотометры // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 4. С. 354–360.
 10. *Anderson G., Clough S., Kneizys F., Chetwynd J., and Shettle E.* AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km) // Air Force Geophys. Laborat. AFGL-TR-86-0110. Environm. Res. Paper. N 954. 25 p.
 11. *Зуев В.Е., Комаров В.С.* Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 264 с.
 12. *Thome K.J., Herman B.M., Reagan J.A.* Determination of precipitable water from Solar transmission // J. Appl. Meteorol. 1992. V. 31. P. 157–165.
 13. *Брюхань Ф.Ф.* Новый аэроклиматический справочник свободной атмосферы над СССР. М.: Гидрометеониздат, 1980. Т. XII. 67 с.
 14. *Чеснокова Т.Ю., Фирсов К.М., Кабанов Д.М., Сакерин С.М.* Спектроскопическое обеспечение для функционирования солнечного фотометра SP-6 // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 11. С. 912–915.
 15. *Фирсов К.М., Мицель А.А., Науменко О.В., Чеснокова Т.Ю.* Влияние погрешностей параметризации и спектроскопической информации на точность расчета уходящей тепловой радиации в каналах радиометра HIRS // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 10. С. 1079–1090.
 16. *Rothman L.S., Jacquemart D., Barbe A., Chris Benner D., Birk M., Brown L.R., Carleer M.R., Chackerian C., Jr., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Hartmann J.-M., Jucks K.W., Maki A.G., Mandin J.-Y., Massie S.T., Orphal J., Perrin A., Rinsland C.P., Smith M.A.H., Tennyson J., Tolchenov R.N., Toth R.A., Vander Auwera J., Varanasi P., Wagner G.* The HITRAN-2004 Molecular Spectroscopy Database // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2005. V. 96. N 2. P. 139–204.

К.М. Фирсов, Ю.В. Воронина, Д.М. Кабанов, С.М. Сакерин. **Determination of water vapor total content from solar photometer measurements.**

A method of water vapor total content (TC) reconstructing from photometric measurements of direct solar radiation is worked out. The effect of spectroscopic errors on the accuracy of reconstructing the water vapor TC are estimated. Different methods for observational data processing are discussed. The results of the reconstruction of H₂O TC are compared with the data obtained with CE-318 photometer operating at the IAO SB RAS as a part of AERONET.