

Исследование стохастической связи коэффициента поглощения водяным паром инфракрасного излучения с температурой точки росы

С.Г. Алёхин¹, В.В. Семенов¹, Г.Г. Щукин^{1,2}

¹ ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации

197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.

E-mail: yka@mil.ru.

² Муромский институт (филиал) ФГБОУ «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

602264, Муром, Владимирская область, ул. Орловская, д.23.

E-mail: oid@mivlgu.ru.

Представлены результаты численных экспериментов по исследованию стохастической связи коэффициента поглощения водяным паром инфракрасного излучения с температурой точки росы. Получена линейная регрессионная зависимость для этих величин, проверка адекватности которой подтвердила ее практическую применимость.

Ключевые слова: прозрачность атмосферы, коэффициент поглощения водяного пара, температура точки росы

Investigation of the stochastic relationship of the absorption coefficient of infrared radiation by water vapor with the dew point temperature

S.G. Alekhin¹, V.V. Semenov¹, G.G. Shchukin²

¹ Mozhaisky Military Space Academy.

² Murom Institute (branch) of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov.

The results of numerical experiments on the study of the stochastic relationship of the absorption coefficient of infrared radiation by water vapor with the dew point temperature are presented. A linear regression dependence is obtained for these values.

Keywords: atmospheric transparency, water vapor absorption coefficient, dew point temperature

Введение

Интенсивное развитие робототехники и систем технического зрения в различных спектральных диапазонах ставит научные проблемы распространения инфракрасного излучения (ИК) в атмосфере на заметное место.

Известно, что водяной пар является основным компонентом атмосферы, поглощающим ИК-излучение. Коэффициент поглощения водяного пара ($\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$) определяется соответствующим показателем поглощения ($k_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$), а также числом поглощающих молекул, которое зависит от температуры воздуха, абсолютной влажности воздуха и длины трассы, проходимой ИК-излучением [1-3]

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) = e^{-k_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \cdot \omega_0}, \quad (1)$$

где ω_0 – толщина слоя осажденной воды на трассе протяженностью $l = 1$ км, мм;

λ – длина волны, мкм.

$$\omega_0 = \frac{216,7 \cdot f \cdot E}{T + 273,16}, \text{ (мм/км);} \quad (2)$$

где f – относительная влажность воздуха, в долях единицы;

E – упругость насыщающего пара, мбар;

T – температура воздуха, °С.

При отсутствии инструментальных метеорологических наблюдений рассчитать $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ для инфракрасного излучения с помощью функциональных зависимостей (1), (2) между метеорологическими величинами, определяющими текущее его значение, не представляется возможным. Обычно исследуются стохастические связи между ними и строятся эмпирические зависимости. Подобному исследованию и посвящены дальнейшие рассуждения.

Краткие теоретические сведения

Для проведения исследования стохастических связей между коэффициентом поглощения водяного пара и другими метеорологическими величинами выполняются следующие вычислительные процедуры:

- а) строятся корреляционные матрицы метеорологических величин;
- б) между метеорологическими величинами устанавливаются статистические связи;
- в) строятся уравнения линейной регрессии с проверкой их адекватности.

Порядок выполнения изложенных процедур и их содержание описаны в [4].

Изначально формируется матрица (3) с результатами наблюдений за метеорологическими величинами

$$X_{[n,m]} = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Каждая строка матрицы (3) заполняется наблюдаемыми метеорологическими величинами, полученными в одном эксперименте (за один срок наблюдения). В каждый столбец матрицы вносятся результаты наблюдений за одной величиной во всех экспериментах (за все сроки наблюдений) [4, 5]. Число величин обозначается через m , а число наблюдений – через n .

Предполагается, что в этой совокупности один столбец соответствует величине, для которой необходимо установить статистическую зависимость с величинами, представленными в остальных столбцах. Тогда обозначается этот параметр через y^* (показатель) и ему в соответствие ставится первый столбец матрицы наблюдений. При этом $m - 1$ столбцов будут соответствовать остальным наблюдаемым величинам – x_1, x_2, \dots, x_m (факторам).

В дальнейшем необходимо установить количественную взаимосвязь между y^* и x_1, x_2, \dots, x_m . Таким образом формулируется задача регрессионного анализа, заключающаяся в выявлении такой статистической зависимости, которая наилучшим образом описывает имеющиеся экспериментальные данные

$$y^* = f(x_1, x_2, \dots, x_m). \quad (4)$$

При постановке задачи (4), необходимо принять следующие допущения:

а) количество данных наблюдений достаточно для проявления статистических закономерностей относительно факторов и их взаимосвязей,

б) ряды данных – однородны;

в) данные наблюдений содержат некоторые ошибки, обусловленные воздействием неучтенных факторов и погрешностями измерений;

г) матрица результатов наблюдений является единственной информацией об изучаемом объекте, имеющейся в распоряжении перед началом исследования.

Функция $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ - есть функция (уравнение) линейной регрессии.

Исследование зависимости коэффициента поглощения ИК-излучения водяным паром от метеорологических величин

Дадим характеристику численным экспериментам, проведенным по вышеописанной схеме.

Корреляционная матрица строилась для значений коэффициента поглощения водяного пара ИК-излучения ($\lambda = 10$ мкм) и значений метеорологических величин у поверхности земли, где самые значимые линейные связи (при уровне значимости $\alpha \leq 0,05$) были установлены для: температуры воздуха ($T_0, ^\circ\text{C}$), температуры точки росы ($Td_0, ^\circ\text{C}$), атмосферного давления ($P_0, \text{гПа}$), относительной влажности воздуха ($f, \%$), метеорологической дальности видимости ($Sm, \text{км}$) (таблица 1).

При этом в качестве исходных данных использовались архивы данных многолетних наблюдений по станции № 26063 (г. Санкт-Петербург) за период с 2005 по 2016 гг для 12.00 часов января, апреля, июля и октября месяцев, полученные с помощью web-технологии удаленного доступа «АИСОРИ».

Общий объем выборки составил 42512 наблюдений, а для одного месяца – в среднем 440 наблюдений.

Таблица 1. Среднемесячные оценки частных коэффициентов корреляции значений $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda = 10$ мкм) и значений метеорологических величин

Месяц	r	Td_0	P_0	f	Sm
январь	-0,96	-0,97	0,50	-0,59	0,18
апрель	-0,39	-0,98	0,25	-0,62	0,14
июль	-0,53	-1,00	0,01	-0,32	-0,02
октябрь	-0,86	-0,99	0,28	-0,53	0,09

Анализ таблицы 1 показывает, что в течение календарного года сильная линейная статистическая связь наблюдается между $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda = 10$ мкм) и Td_0 . Этому эффекту есть и физическое обоснование. Согласно [7], точка росы (Td_0) является температурой при которой содержащийся в воздухе водяной пар, при постоянных общем атмосферном давлении и массовой доле пара, становится насыщенным по отношению к плоской поверхности воды (или льда). Где точка росы служит характеристикой влажности воздуха. В свою очередь, коэффициент поглощения водяного пара функционально связан с толщиной слоя осажденной воды (ω_0), которая также является теоретическим индексом влагосодержания воздуха.

С этой точки зрения наличие сильной статистической связи между рассматриваемыми величинами выглядит вполне естественно, а линейная регрессионная зависимость будет иметь вид

$$\tilde{\tau}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) = (\tilde{c}_0(\lambda) + \tilde{c}_1(\lambda)Td_0)^l, \quad (5)$$

где $(\tilde{c}_0(\lambda), \tilde{c}_1(\lambda))$ – оценки коэффициентов регрессии, полученные для исследуемого физико-географического района, сезона года и времени суток.

Уравнение (5) характеризует зависимость между вариацией показателя $\tilde{\tau}_{H_2O}(\lambda)$ и вариациями факторов Td_0 . Качество полученного уравнения оценивается по степени близости между результатами наблюдений за показателем $\tau_{H_2O}(\lambda)$ и предсказанными по уравнению регрессии его значениями $\tilde{\tau}_{H_2O}(\lambda)$ в заданных точках пространства. Если результаты близки, то задачу регрессионного анализа можно считать решенной. Так, в таблице 2 представлены оценки качества коэффициентов регрессии уравнения (5), при $\lambda=10$ мкм для г. Санкт-Петербург.

Представленные в таблице 2 оценки получены на основе архивов данных многолетних наблюдений по станции № 26063 (г. Санкт-Петербург) за период с 2017 по 2020 гг для 00.00 и 12.00 часов января, апреля, июля и октября месяцев.

Таблица 2. Оценки качества коэффициентов регрессии уравнения (5), $\lambda=10$ мкм, г. Санкт-Петербург

Месяц	Срок	Объем выборки, случ.	Коэффициенты регрессии		Доверительный интервал для c_0 , при $\alpha = 0,05$		Доверительный интервал для c_1 , при $\alpha = 0,05$	
			c_0	c_1	левый	правый	левый	правый
январь	12	356	0,946	-0,00248	0,9457	0,9472	-0,00255	-0,00241
	00	358	0,947	-0,00248	0,9459	0,9475	-0,00255	-0,00241
апрель	12	358	0,942	-0,00369	0,9412	0,9418	-0,00375	-0,00362
	00	345	0,942	-0,00353	0,9412	0,9418	-0,00361	-0,00346
июль	12	367	0,968	-0,00743	0,9664	0,9689	-0,00752	-0,00734
	00	362	0,967	-0,00748	0,9657	0,9681	-0,00756	-0,00739
октябрь	12	371	0,942	-0,00475	0,9419	0,9426	-0,00481	-0,00468
	00	369	0,942	-0,00469	0,9414	0,9423	-0,00477	-0,00462

Оценки качества полученного уравнения регрессии представлены в таблице 3.

Таблица 3. Оценки качества уравнения линейной парной регрессии (5), $\lambda=10$ мкм, г. Санкт-Петербург

Сезон	Срок, ч	Вид регрессии	η_T	σ_T	R	D_R	F	$F_{кр}$
январь	12	$\tau_{H_2O}(10) = 0,946 - 0,0025Td$	0,003	0,004	0,97	0,94	1393,0	3,95
	00	$\tau_{H_2O}(10) = 0,946 - 0,0024Td$	0,003	0,004	0,97	0,95	1571,0	3,94
апрель	12	$\tau_{H_2O}(10) = 0,942 - 0,0037Td$	0,002	0,003	0,99	0,98	3428,4	3,94
	00	$\tau_{H_2O}(10) = 0,942 - 0,0035Td$	0,001	0,002	0,99	0,98	4068,0	3,94
июль	12	$\tau_{H_2O}(10) = 0,967 - 0,0074Td$	0,002	0,003	0,99	0,98	6993,4	3,94
	00	$\tau_{H_2O}(10) = 0,967 - 0,0074Td$	0,002	0,003	0,99	0,99	6993,8	3,94
октябрь	12	$\tau_{H_2O}(10) = 0,942 - 0,0048Td$	0,002	0,003	0,99	0,98	2754,7	4,00
	00	$\tau_{H_2O}(10) = 0,942 - 0,0047Td$	0,002	0,002	0,99	0,98	3793,8	4,00

Пояснение к таблице 3: $\tau_{H_2O}(\lambda)$ - коэффициент поглощения водяного пара при поглощающем слое 1 км; η_{τ} - средняя абсолютная ошибка расчета; σ_{τ} - средняя квадратическая ошибка расчета; R - коэффициент корреляции, D_R - коэффициент детерминации, F - рассчитанное значение статистики Фишера, $F_{кр}$ - критическое значение статистики Фишера.

Из анализа таблиц 3 следует, что полученная линейная регрессионная зависимость для прогнозирования коэффициента поглощения инфракрасного излучения водяным паром адекватна соответствующим физическим процессам, происходящими с влажностью в атмосфере, и пригодна для практического использования.

Выводы

Таким образом, в результате проведенного исследования:

- обнаружена сильная линейная статистическая связь между $\tau_{H_2O}(\lambda)$ и температурой точки росы;
- построена детерминированная по физико-географическому району, месяцу и времени суток линейная регрессионная зависимость (5) для прогнозирования значений $\tau_{H_2O}(\lambda)$;
- установлено, что качество уравнения (5) позволяет применять его на практике, и существенно минимизировать число исходных данных для оперативного расчета $\tau_{H_2O}(\lambda)$ в условиях отсутствия инструментальных метеорологических наблюдений в интересующих районах, или ограниченного их количества.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-19-00378 (<https://rscf.ru/projekt/21-19-00378>)

Литература

- [1] Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 192 с.
- [2] Зуев В.Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. – М.: Советское радио, 1966. – 318 с.
- [3] Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н. Всепогодность радиолокационных и тепловизионных каналов наведения комплексов ПВО. – М.: Машиностроение, 2013. 280 с.
- [4] Алёхин С.Г., Шемелов В.А., Туркин А.А. Метод статистического построения справочной модели геосфер военного назначения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского – СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013 г. – Вып. № 640. – С. 161-170.
- [5] Математическая статистика: Учебник / В. М. Иванов, В. Н. Калинина, Л. А. Нешумова и др. – М.: Высшая школа, 1981. – 371 с.
- [6] Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.