

УДК 551.501: 629.195.1

Доктор техн. наук  
Канд. техн. наукА.Х. Ахмеджанов<sup>1</sup>  
Т.К. Караданов<sup>1</sup>**ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В АТМОСФЕРЕ  
КАЗАХСТАНА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

**Ключевые слова:** атмосфера, водяной пар, содержание, перенос излучения, дистанционное зондирование Земли, парниковые газы

*Рассматривается содержание водяного пара в атмосферном столбе на территории Казахстана по данным дистанционного зондирования Земли из космоса. Проведен анализ вертикальных профилей содержания водяного пара. Исследованы сезонные и многолетние изменения содержания водяного пара в атмосферном столбе.*

Водяной пар, являясь самым распространенным парниковым газом, смягчает влияние других парниковых газов. Он может конденсироваться с образованием облаков, которые сильно влияют на температурный режим и циркуляцию атмосферы. Водяной пар имеет естественное происхождение: внешние факторы не способны влиять на его увеличение в окружающей среде. Важная характеристика свойств водяного пара – обратная положительная связь с углекислым газом. Установлено, что парниковый эффект, спровоцированный выбросом диоксида углерода, увеличивается примерно вдвое благодаря воздействию молекул водяного испарения.

Проведены исследования сезонных особенностей содержания водяного пара на атмосферу аридной зоны [1]. Рассмотрены возможности получения детальных данных по восстановлению профиля водяного пара в атмосфере [4].

В [6] изложены методы определения малых газовых компонент в атмосфере Земли. Спутниковый метод измерения в ИК области спектра для измерения водяного пара в средней тропосфере представлен в [2]. Представлены результаты анализа содержания водяного пара в атмосфере над европейской территорией России в период лесных и торфяных пожаров летом 2010 г. в [5]. Особенности рас-

---

<sup>1</sup> АО "Национальный центр космических исследований и технологий", г. Алматы, Казахстан

предела водяного пара на территории Казахстана на основе спутниковых данных представлены в [3]. В этой работе показано, что пространственное распределение водяного пара связано с региональными особенностями атмосферной циркуляции. Данные OMI отслеживают сезонные и межгодовые колебания содержания водяного пара в столбе для широкого диапазона климатических режимов [15]. В [10] представлен алгоритм поиска, используемый для получения содержания водяного пара в столбе от датчиков GOME-2 на борту MetOp-A и MetOp-B. Алгоритм поиска основан на классическом методе дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (DOAS). Возможность получения значений дневного общего содержания водяного пара в атмосферном столбе из измерений MODIS над поверхностями суши показано в [9]. Алгоритм адаптирован для системы MERRA-2 (реанализ и визуализация спутниковых данных).

В настоящее время активно разрабатываются технологии дистанционного инфракрасного зондирования атмосферы для мониторинга термодинамического состояния и состава атмосферы Земли [7, 12, 14]. Создана база данных спектроскопической информации по атмосферным газам (HITRAN [13], GEISA [11], база данных температуры и концентраций оптически активных газов составляющих атмосферы в базе TIGR [8], данные системы BADC и др. Системы GIOVANNI, GES-DISC объединяет данные многих спутниковых систем. Современные космические технологии измерений и вычислений содержания малых атмосферных газов показали свою эффективность в исследованиях температуры подстилающей поверхности, стратификации атмосферы, атмосферных газов, химических процессов в тропосфере и стратосфере и др.

Радиационный перенос в атмосфере определяется содержанием газов, поглощающих излучение, таких, как водяной пар, диоксид углерода, метан, озон, окись азота и др. Каждый из атмосферных газов на определенной частоте поглощает излучение иначе, чем другие газы. Для восстановления концентрации атмосферных газов используются методы, основанные на поглощении излучения в инфракрасной области электромагнитного спектра. Данные представлены геопорталом Giovanni.

На краткосрочных ежедневных данных по территории Казахстана на ряде участков нет данных. В случае небольших участков в два-три пикселя можно использовать методы интерполяции. Но во многих случаях это большие территории. Поэтому необходимо восстанавливать на этих участках необходимые данные расчетными методами.

Измеряемое спутниками тепловое излучение, есть сумма всех излучений элементарных слоев атмосферы, характеризующееся функцией

ослабления теплового излучения  $F_\lambda(p)$ , зависящая от давления  $P$  и температуры  $T(p)$ , а также от длины волны  $\lambda$  (или частоты  $\nu$ ), на котором фиксируется излучение, угла визирования  $\vartheta$  со спутника.

Интенсивность восходящего теплового излучения в атмосфере уравнение переноса в изобарической системе координат можно представить в виде:

$$J_\lambda^\uparrow(p) = B_\lambda[T(p_0)] * F_\lambda(p_0) + \int_{p_0}^0 B_\lambda[T(p)] \frac{dF_\lambda(p)}{dp} dp, \quad (1)$$

где  $J_\lambda^\uparrow(p)$  – восходящее тепловое излучение,  $B_\lambda[T(p)]$  – функция Планка,  $p_0 = 1000 \text{ гПа}$  – давление на земной поверхности. Функция ослабления теплового излучения определяется в виде

$$F_\lambda = e^{-\frac{\tau_\lambda}{\cos\vartheta}}, \quad (2)$$

$$\tau_\lambda = \int_{p_0}^p \alpha_\lambda \rho(p) dp, \quad (3)$$

где  $\tau_\lambda$  – оптическая толщина атмосферы,  $\alpha_\lambda$  – массовый коэффициент поглощения излучения с размерностью  $[\frac{\text{м}^2}{\text{кг}}]$ ,  $\rho(z)$  – плотность газа  $[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}]$ , поглощающее излучение. Измеряемое на спутнике восходящее тепловое излучение (радианс) обозначим  $J_\lambda^\uparrow(p_h)$ , где  $p_h$  – высота спутника.

Для расчета плотности поглощающего газа соотношение перепишем в следующем виде:

$$J_{\lambda\text{рад}}^\uparrow(p_n) = B_\lambda[T(p_0)] * e^{-\frac{\tau_\lambda}{\cos\vartheta}} - \frac{\alpha_\lambda}{\cos\vartheta} \int_{p_0}^0 B_\lambda[T(p)] e^{-\frac{\tau_\lambda}{\cos\vartheta}} \rho(p) dp, \quad (4)$$

где  $J_{\lambda\text{рад}}^\uparrow(p_n)$  – интенсивность излучения, измеряемого на платформе спутника с высоты  $p_n$ .

Если разбить на элементарные участки  $\Delta p$  высоту с учетом малого значения оптической толщины атмосферы и угла зондирования близким к надиру, то можно получить систему приближенных уравнений для определения содержания за  $\rho(p_i)$ , поглощающего излучение на высоте  $p_i$ , на разных длинах волн  $\lambda_j$ :

$$\sum_{i=1}^n (B_{\lambda_j}[T(p_i)] \Delta p + B_{\lambda_j}[T(p_0)] \rho(p_i) = \frac{\cos\vartheta}{\alpha_{\lambda_j}} B_{\lambda_j}[T(p_0)] - J_{\lambda_j\text{рад}}^\uparrow(p_n). \quad (5)$$

Эта система уравнений позволяет определять плотность газа, поглощающего излучение. Расчетные подходы и результаты реанализа спутниковых данных MERRA-2 (Model M2TMNXCHM v5.12.4) позволяют получить поля распределения малых составляющих атмосферы по территории Казахстана и провести статистический анализ их распределения.

Для анализа содержания водяного пара в атмосфере использовались данные уникального зондирующего комплекса AIRS, установленного на

спутнике Aqua/NASA-EOS. Комплекс, разрабатывался для решения задач спутниковой метеорологии для измерения вертикальных профилей температуры и влажности в нижнем слое атмосферы в глобальном масштабе с погрешностью меньшей, чем погрешность современных радиозондов.

Вертикальные профили водяного пара восстановлены по территории Казахстана на выделенных участках профилей на западе, востоке, севере и юге Казахстана за период с 2003 г. по май 2019 г. Участки, на которых были восстановлены вертикальные профили содержания водяного пара, были выбраны со следующими координатами: север: 65...71 в.д., 50...56 с.ш.; юг: 66...71 в.д., 42...47 с.ш.; запад: 49...54 в.д., 46...51 с.ш.; восток: 78...83 в.д., 46...51 с.ш. Распределения вертикальных профилей содержания водяного пара в атмосфере представлены на рис. 1. Выше 900 гПа больших отклонений не наблюдается, а ниже различия имеются: минимум содержания водяного пара наблюдается на востоке – 2,8 г/кг, а максимум на западе – 4,5 г/кг. На севере – 3,5 г/кг, на юге – 3,6 г/кг.

Сезонные изменения содержания водяного пара в атмосферном столбе по территории Казахстана с 2003 по июль 2019 гг. показаны на рис. 2. На графике показано, что в летнее время наблюдаются максимальные значения содержания водяного пара в атмосфере (среднее – 20,47 кг/м<sup>2</sup>), в зимнее – минимальные (среднее – 5,31 кг/м<sup>2</sup>). Весной и осенью средние значения, причем в среднем одинаковые (10,45 кг/м<sup>2</sup> и 10,81 кг/м<sup>2</sup>). Статистический анализ сезонного содержания водяного пара в атмосферном столбе представлен в табл. 1. Стандартные ошибки, отклонения и дисперсия выборки максимальны в летнее время. Значения медианы и моды в летнее время в 4 раза больше, чем в зимнее время и 2 раза больше, чем весной и осенью. Максимум концентрации водяного пара приходится на июль, а минимум на январь. Территориальное распределение содержания водяного пара в атмосферном столбе по территории Казахстана в среднем за период с 2003 по 2019 гг. представлен на рис. 3. На нем представлены изменения содержания водяного пара в атмосферном столбе по территории Казахстана за период с 2003 г. по июнь 2019 г. и линия тренда. Максимальное содержание водяного пара в атмосферном столбе по территории Казахстана наблюдается на западе и юге, минимальное на севере и востоке. Изменения содержания водяного пара в атмосферном столбе по территории Казахстана и линия тренда показаны на рис. 4. За указанный период содержание водяного пара в атмосферном столбе по территории Казахстана увеличилась на 7 %.

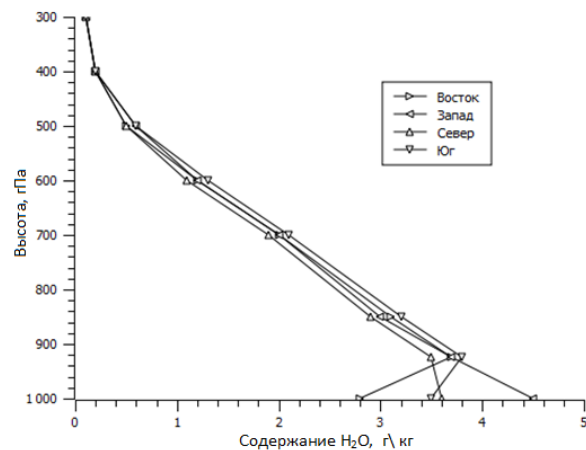


Рис. 1. Вертикальные профили содержания водяного пара на участках по территории Казахстана.

Таблица 1

Статистический анализ содержания водяного пара в атмосферном столбе ( $\text{кг}/\text{м}^2$ )

	Зима	Весна	Лето	Осень
Среднее	5,31	10,45	20,47	10,81
Стандартная ошибка	0,09	0,12	0,16	0,093
Медиана	5,3	10,3	20,4	10,8
Мода	5,1	10,1	20,1	10,6
Стандартное отклонение	0,40	0,51	0,69	0,38
Дисперсия выборки	0,16	0,26	0,47	0,14
Экссесс	-0,12	-0,19	0,23	-0,84
Асимметричность	0,28	0,53	0,03	-0,18
Минимум	4,7	9,8	19,1	10,1
Максимум	6,2	11,6	21,7	11,4

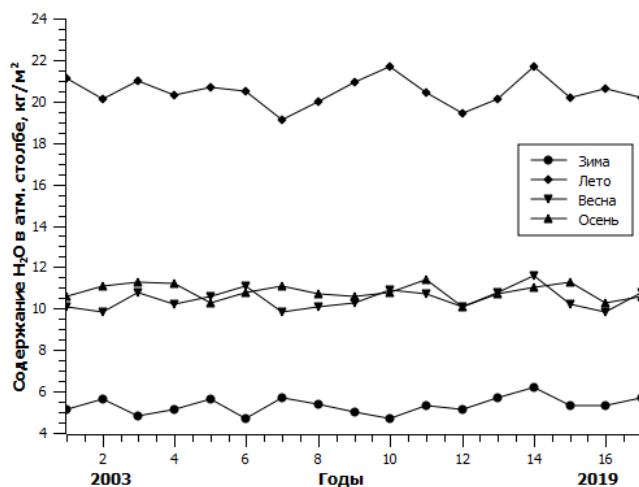


Рис. 2. Сезонные изменения содержания водяного пара в атмосферном столбе по территории Казахстана.

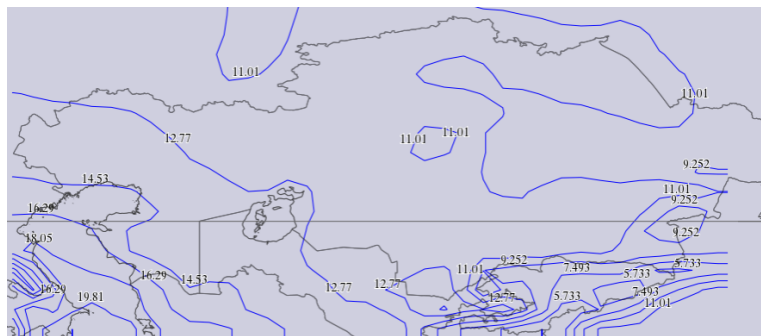


Рис. 3. Территориальное распределение содержания водяного пара в атмосферном столбе ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) по территории Казахстана в среднем за период с 2003 по 2019 гг.

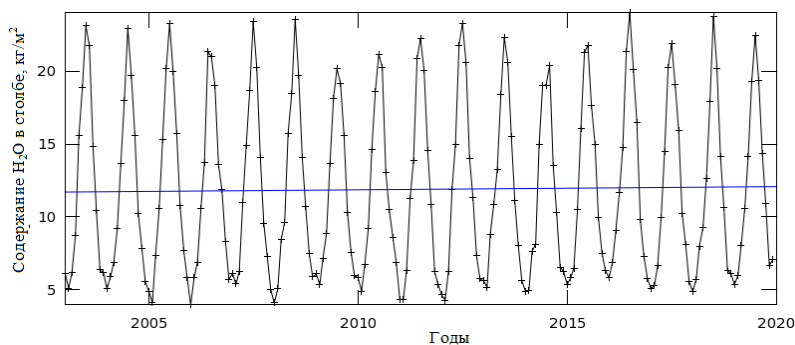


Рис. 4. Изменения содержания водяного пара в атмосферном столбе по территории Казахстана и линия тренда.

Таким образом, анализ сезонных изменений содержания водяного пара в атмосферном столбе с 2003 г. по 2019 г. показал, что в летнее время наблюдаются максимальные значения содержания водяного пара в атмосфере, в зимнее – минимальные, весной и осенью – средние значения (в среднем одинаковые). Максимальное содержание водяного пара в атмосферном столбе по территории Казахстана наблюдается на западе и юге, минимальное на севере и востоке. Содержание водяного пара в атмосферном столбе за последние 17 лет увеличилось на 7 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Салихов Т.Х. Содержание водяного пара в атмосфере аридной зоны // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 50, № 2. – С. 205-214.

2. Аль-Тамими М.А., Чукин В.В. Параметризация глобального испарения на основе спутниковых данных о влагосодержании атмосферы // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 2. – С. 137-141.
3. Ахмеджанов А.Х., Караданов Т.К., Искаков А.Н. Распределение водяного пара на территории Казахстана на основе спутниковых данных // Гидрометеорология и экология. – 2014. – № 2. – С.87-96.
4. Семин А.Г., Кузьмин А.В., Хапин Ю.Б., Шарков Е.А. О возможности восстановления вертикального распределения водяного пара в атмосфере тропиков по измерениям в линии 183 гц из космоса // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 2. – С. 41-52.
5. Ситнов С.А., Мохов И.И. Особенности распределения водяного пара в атмосфере над европейской территорией России летом 2010 г. // Доклады РАН. – 2013. – Т. 448. – N. 2. – С. 206–212.
6. Стерлядкин В.В., Косов А.С. Определение вертикального профиля водяного пара в атмосфере до 80 км по радиопросвечиванию трассы спутник-Земля // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 3. – С. 14-26.
7. Beer R., Glavich T.A., Rider T.M. Tropospheric emission spectrometer for Earth Observing Systems's Aura satellite // Applied Optics. – 2001. – V. 40. – № 15. – P. 23-56.
8. Chevallier F., Morcrette J.J., Chedin A., Cheruy F. TIGR-like atmospheric-profile databases for accurate radiative-flux computation // Quart. J. of the Roy. Met. Soc. – 2000. – V. 126. – № 563. – P. 777-785.
9. Diedrich H., Preusker R., Lindstrot R., Fischer J. Retrieval of daytime total columnar water vapour from MODIS measurements over land surfaces // Atmospheric Measurement Techniques. – 2015. – V. 8. – P. 823-836.
10. Grossi, M., Valks P., Loyola D., Aberle B. Total column water vapour measurements from GOME-2 MetOp-A and MetOp-B // Atmospheric Measurement Techniques. – 2015. – V.8. – P. 1111-1133/
11. Jaquinet-Husson N., Scott N.A. and etc. The GEISA spectroscopic database: Current and future archive for Earth and planetary atmosphere studies // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2008. – V.109. – № 6. – P.1043-1059.
12. Parkinson C.L. Aqua: an Earth-Observing Satellite mission to examine water and other climate variables // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions. – 2003. – V. 41 – № 2. – P. 173-183.
13. Rothman L.S., Gordon I.E., etc. The HITRAN molecular spectroscopic database // JQSRT. – 2008. – V.110. – P. 533-572.