

УДК 551.57:556.1

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ИСПАРЕНИЯ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ О ВЛАГОСОДЕРЖАНИИ АТМОСФЕРЫ**Аль-Тамими М.А., Чукин В.В.***ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»,
Санкт-Петербург, e-mail: muthannaabd@yahoo.com*

Круговорот воды в природе играет большую роль в жизни на планете и тесно связан с обменом энергией между оболочками Земли, что в конечном счете определяет климат. Существуют различные методы дистанционного зондирования водяного пара в атмосфере, однако только спутниковые методы позволяют получить оценки глобального распределения влагосодержания атмосферы. Предлагаемая нами статистическая модель основана на использовании спутниковых данных о влагосодержании атмосферы для оценки глобального испарения. Проведенные расчеты показывают, что относительная ошибка оценки скорости испарения с помощью данной модели не превосходит 1,8%. Поскольку процесс испарения является важным звеном гидрологического цикла и при этом его скорость не измеряется корректно существующими методами зондирования атмосферы, то полученный метод крайне важен для понимания гидрологического цикла и изучения процессов в климатической системе.

Ключевые слова: гидрологический цикл, параметризация, испарение, осадки, влагосодержание атмосферы**PARAMETERIZATION OF GLOBAL EVAPORATION RATE BASED ON SATELLITE DATA OF PRECIPITABLE WATER VAPOR****Al-Tameemi M.A., Chukin V.V.***Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, e-mail: muthannaabd@yahoo.com*

The hydrological cycle plays a key role in life on the our planet. It is closely related with exchanges of energy between Earth's surface and the atmosphere, which ultimately determines the climate. There are various remote sensing methods to estimate atmospheric water vapor, but satellite methods only allow to get estimates global distribution of perceptible water vapor in the atmosphere. we propose a novel statistical model based on using satellite data of the perceptible water vapor in the atmosphere to estimate global evaporation. The calculations show that the relative estimation error of the evaporation rate using the model does not exceed 1,8%. Since the evaporation process is an important part of the hydrological cycle and thus it's rate is not measured properly by existing methods for sounding the atmosphere, the resulting method is very important for understanding the hydrological cycle and for studying the processes of the climate system.

Keywords: water cycle, parameterization, evaporation, precipitation, precipitable water vapor

Гидрологический цикл описывает непрерывное движение воды в природе. Вода необходима для существования жизни на Земле и помогает объединить вместе сушу, океаны и атмосферу в одну интегрированную систему. Циркуляция воды тесно связана с обменом энергией между оболочками Земли, что определяет климат планеты и вызывает значительную изменчивость климата, поскольку изменения климата влияют на качество жизни как раз преимущественно путем изменений гидрологического цикла, который играет важную роль в энергетическом балансе: водяной пар является наиболее важным парниковым газом в атмосфере – значительная часть теплового излучения планеты поглощается атмосферой и переизлучается обратно, существенно увеличивая температуру системы.

Методы дистанционного зондирования водяного пара в атмосфере

Более 99% атмосферной влаги находится в парообразном состоянии.

Водяной пар является важной частью энергетики атмосферы, которая управляет развитием погодообразующих процессов в малых временных масштабах и влияет на климат планеты на больших временных интервалах. Молекулы водяного пара являются важнейшим газовым компонентом атмосферы. В первую очередь они являются главным парниковым газом, который поглощает больше, чем углекислый газ. Перенос водяного пара и связанного с ним скрытого тепла конденсации обеспечивает около 50% переноса тепла от тропиков к полюсам.

Влагосодержание атмосферы является мерой массового содержания водяного пара в вертикальном столбе атмосферы единичного сечения. Этот параметр является интегралом по высоте от вертикального профиля парциального давления водяного пара, которое в свою очередь пропорционально концентрации молекул водяного пара.

Измерения метеорологических станциями

Существует несколько приборов для измерения влажности атмосферного воздуха, такие как гигрометр и психрометр, который измеряет температуру сухого и смоченного термометров. Психрометр изготавливается путем обертывания резервуара термометра влажным материалом с последующим его обдувом, что приводит к понижению температуры в результате испарения воды с материала. Если воздух сухой, испарение будет сильным и температура упадет сильнее, по сравнению с влажным воздухом. Следовательно, разница температур сухого и смоченного термометров может быть использована как индикатор влажности воздуха [2].

Радиозондирование атмосферы

Последние 80 лет радиозонды были главным источником информации о вертикальном профиле атмосферных параметров, используемых при прогнозировании погоды и в климатических исследованиях. В процессе подъема радиозонда оболочкой, наполненной газом, измеряются температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра от земной поверхности до нижней стратосферы и передаются по радиоканалу на наземную приемную станцию для дальнейшей обработки. Довольно полный обзор радиозондов дан в работе [7]. Радиозонды изготавливаются различными производителями и используют различные типы датчиков влажности воздуха, такие как пленочные датчики, литий-хлоридные датчики, углеродные гигристоры и тонкопленочные конденсаторы [8]. Измерения этими датчиками достаточно точны при высоких температурах воздуха и значительном содержании водяного пара. Принцип действия датчиков, как правило, основан на изменении их электрического сопротивления, емкости или размера [11]. Подобные измерения обладают наибольшей точностью информации о вертикальном распределении влажности воздуха, но измерения проводятся крайне редко, 1–2 раза в сутки.

Лидарные измерения влажности воздуха

Дистанционные измерения водяного пара с помощью лидара основаны на эффекте рассеяния и поглощения электромагнитного излучения газами, жидкими и твердыми аэрозолями. Этот метод применим при размещении лидара, как на земной поверхности, так и на самолетах и спутниках.

Излучаемый лазером импульс на длине волны λ распространяясь в атмосфере рассеивается на молекулах и его часть возвращается к телескопу. Расстояние до рассеивающих молекул определяется по известной скорости света и времени распространения сигнала. Другой метод лидарного зондирования основан на использовании Рамановского рассеяния, названного в честь Ч.В. Рамана, который первым провел параллель между взаимодействием X-лучей с электронами и неупругим рассеянием света на молекулах. При таком взаимодействии длина волны рассеянного света смещается на значение, которое зависит от разницы энергий между вибрационными и/или ротационными уровнями молекулы [8]. Лидарный метод применим только в безоблачной атмосфере, в то время как примерно 65% земного шара покрыто облаками, то есть метод применим в среднем только в 1/3 времени проведения наблюдений.

Спутниковый метод радиопросвечивания атмосферы

Метод радиопросвечивания использует микроволновые радиосигналы, излучаемые передатчиками спутников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Система ГНСС изначально создана для определения положения приемного устройства в пространстве по известному положению спутников. В настоящее время группировка ГНСС состоит из 23 спутников ГЛОНАСС и 31 спутника GPS. Каждый навигационный спутник излучает сигналы на двух частотах в диапазоне L1 и L2 [5].

При распространении радиосигналов через атмосферу от передатчиков спутников ГНСС до приемников на земной поверхности, они задерживаются и их траектории искривляются как ионизированной ионосферой, так и нейтральной тропосферой. Ионосферные эффекты могут быть в значительной степени устранены путем использования двухчастотных приемных устройств. Так называемая гидростатическая часть тропосферной задержки довольно точно оценивается по данным о приземном атмосферном давлении. Однако, «влажная» часть тропосферной задержки, которая зависит от интегрального содержания водяного пара в атмосфере, может быть оценена из результатов обработки навигационных данных и использована для мониторинга влагосодержания атмосферы [1]. Достоинством метода является его высокое временное разрешение, но при этом

измерения влагосодержания атмосферы проводятся только над пунктом установки приемника и требуется использование сети приемников для получения пространственного распределения содержания водяного пара.

Другим методом, использующим радиосигналы ГНСС, является лимбовый метод зондирования, который предполагает прохождение радиосигнала от ГНСС спутника до низкоорбитального спутника через слой атмосферы. Принцип зондирования основан на явлении искривления траектории распространения сигнала и его замедления в атмосфере. Атмосферная задержка определяется по известному положению передающего и принимающего спутников. По мере прохождения сигнала через атмосферу он искривляется в результате влияния вертикального профиля показателя преломления, который зависит как от температуры, так и от влажности воздуха [12]. Проведение последовательных зондирований при разных расстояниях от траектории распространения сигнала до земной поверхности позволяет оценить профиль влажности воздуха, осредненный по горизонтали на несколько сотен километров. Достоинством метода является возможность проведения измерений над океанами, где крайне мало метеорологической информации, однако места зондирования профиля влажности распределены по земному шару неупорядоченно.

Спутниковый метод измерения в ИК области спектра

Этот метод используется для измерения водяного пара в средней тропосфере и выше и основан на излучении электромагнитных волн молекулами на длине волны 6,7 мкм. На борту большинства метеорологических спутников установлены инфракрасные радиометры водяного пара и существует значительное количество методов, основанных на этих данных, позволяющих оценивать влажность атмосферы. Однако в большинстве случаев измерения содержания водяного пара по ИК радиации невозможны при наличии облаков [8]. На борту геостационарных спутников МЕТЕОСАТ установлен радиометр SEVIRI с двумя каналами на длинах волн 6,2 и 7,3 мкм. Спутники NOAA и MetOp также имеют прибор HIRS, регистрирующий излучение на длинах волн 6,7–8,2 мкм. Геостационарные спутники GOES и GMS-5 располагают прибором VAS, который осуществляет измерения на длинах волн 6,7 и 7,3 мкм [3].

Спутниковый метод микроволнового зондирования атмосферы

Оценка влагосодержания атмосферы может быть осуществлена по данным микроволновых сенсоров, которые позволяют получать информацию при любой погоде [4]. Этот метод основан на эффекте поглощения водяным паром электромагнитных волн в диапазоне частот от 20 до 200 ГГц, который связан вращательным переходом молекулы воды на 22,235 ГГц и более сильным переходом на 183,31 ГГц. Кроме того, в этой области спектра наблюдается поглощение в «крыльях» полос поглощения водяным паром в ИК области спектра [13]. Существует большое количество типов микроволновых приборов, устанавливаемых на спутниках, таких как SSM/I на спутниках DMSP, AMSR-E на спутнике Aqua и AMSU-A, AMSU-B на NOAA [9].

Результаты исследований по параметризации скорости испарения

Традиционные непосредственные измерения скорости испарения, в силу ограниченной доступности установок и низкого пространственного разрешения, не могут быть использованы для мониторинга процесса испарения в глобальном масштабе. Для получения глобальной метеорологической информации повсеместно привлекаются спутниковые данные, но, к сожалению, скорость испарения – это такой климатический параметр, который не определяется приборами метеорологических спутников, поскольку он напрямую не взаимодействует с электромагнитными волнами и поэтому не может быть измерен из космоса. С другой стороны, в последние десятилетия вырос интерес как к крупномасштабным гидрологическим процессам, так и к дистанционным методам определения параметров окружающей среды. Это привело к появлению исследований по оценке испарения в глобальном масштабе путем использования наземных и спутниковых данных.

На кафедре экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета нами разработан подход для определения глобального испарения, который основан на использовании данных о влагосодержании атмосферы, определяемом по данным спутниковых измерений.

Известно, что интенсивность осадков и скорость испарения – это два основных параметра гидрологического цикла. Испарение может привести к появлению

обратных связей в крупномасштабных процессах водообмена и повлиять на динамику атмосферы. Нами ранее получено эмпирическое соотношение между скоростью испарения и влагосодержанием атмосферы:

$$E = c \cdot PWV,$$

здесь E – скорость испарения; PWV – влагосодержание атмосферы; c – эмпирический коэффициент, определяемый как отношение между количеством выпавших за год осадков к среднему за год влагосодержанию атмосферы. Это соотношение предполагает использование среднегодовых глобальных значений как скорости испарения, так и влагосодержания атмосферы. При выводе соотношения использовано предположение о равенстве значений испарения и осадков за год, осредненных по всему земному шару, так как иное привело бы к изменению глобального влагосодержания атмосферы, что подтверждается результатами осуществленного численного моделирования климата с помощью модели Planet Simulator.

Для определения значения эмпирического коэффициента c модели были использованы среднемесячные значения данных глобального распределения влагосодержания атмосферы проекта ISCCP [6] и глобального распределения количества осадков проекта GPCP [10] за период с 1983 по 2003 гг. в узлах сетки $2,5 \times 2,5^\circ$. Временные ряды данных были разделены на две выборки: с 1983 по 1993 г. (выборка 1) и с 1993 по 2003 г. (выборка 2). Сначала использовалась первая выборка в качестве обучающей, а вторая – в качестве контрольной, а затем наоборот. В результате использования глобальных данных об осадках и влагосодержании атмосферы были определены коэффициенты c эмпирической модели для двух периодов: 1983–1993 и 1993–2003 для каждой точки сетки размером 144×72 .

Осредненное по всему земному шару значение коэффициента c за период с 1983 по 1993 г. оказалось равным 0,137, а за период с 1993 по 2003 г. равно 0,139. Таким образом, далее можно считать среднее глобальное значение коэффициента c не зависящим от времени и равным 0,138.

Обсуждение результатов верификации эмпирической модели оценки глобального испарения

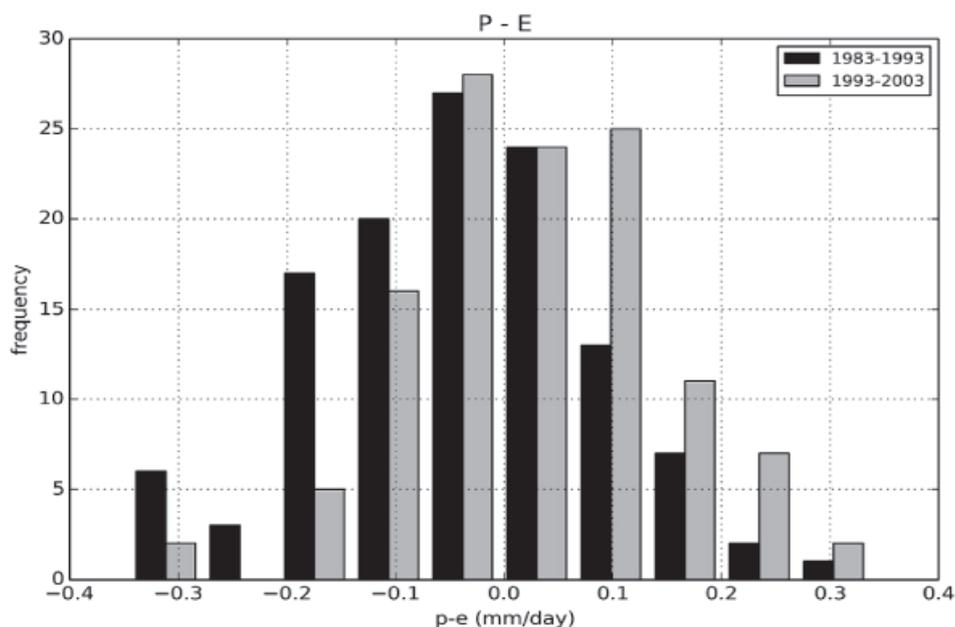
При определении глобальной скорости испарения с помощью предложенной модели для периода с 1983 по 1993 гг. нами было использовано значение коэффициента c модели, определенного по выборке № 2, а при расчетах испарения в период с 1993 по 2003 гг. – значения коэффициента c , рассчитанные по данным выборки № 1. Этот подход использовался для того, чтобы избежать повторного использования данных о влагосодержании атмосферы.

Статистическая модель связи влагосодержания атмосферы со скоростью испарения была проверена на основе спутниковых данных. Результаты расчетов скорости глобального испарения на основе данных о влагосодержании атмосферы сопоставлены с данными о количестве осадков для двух периодов: 1983–1993 и 1993–2003 гг.

Результаты сопоставления, представленные в таблице, показывают, что относительная ошибка оценки испарения не превосходит 1,8%. На рисунке представлена гистограмма распределения абсолютных ошибок оценок разности скорости испарения и интенсивности осадков ($P-E$), которая показывает незначительные различия параметров распределения (среднего значения и среднеквадратического отклонения) за периоды 1983–1993 и 1993–2003 гг.

Результаты верификации статистической модели

Выборка	Период	C	E	P	P-E
1	1983–1993	0,137	2,725	2,678	$-0,047 \pm 0,285$
2	1993–2003	0,139	2,646	2,685	$0,039 \pm 0,292$



Ошибки оценки глобального испарения по спутниковым данным о влагосодержании атмосферы

Заключение

Существуют различные методы использования спутниковых данных для оценки скорости испарения. Эти методы дают различные оценки испарения, что обусловлено в первую очередь различиями в самих методах, основанных на уравнении баланса энергии и эмпирических формулах, учитывающих скорость ветра, температуру и атмосферное давление. Предлагаемая нами статистическая модель основана на использовании спутниковых данных только о влагосодержании атмосферы для оценки глобального испарения. Относительная ошибка оценки скорости испарения с помощью модели не превосходит 1,8%. Поскольку процесс испарения является важным звеном гидрологического цикла и при этом его скорость не измеряется корректно существующими методами зондирования атмосферы, то полученный метод оценки скорости испарения крайне важен для понимания гидрологического цикла и изучения процессов в климатической системе, таких, например, как изменения климата.

Список литературы

1. Bevis M., et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // Journal of Geophysical Research. – 1992. – Vol.97, № D14. – P. 15787–15801.

2. Brock F.V., Richardson S.J. Meteorological measurement systems. – Oxford University Press, 2001.

3. Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies: site. – URL: <http://cimss.ssec.wisc.edu> (дата обращения: 13.01.2016).

4. Elgered G., Rönnäng B.O., Askne J.I.H. Measurements of atmospheric water vapor with microwave radiometry // Radio Science. – 1982. – Vol. 17, № 5. – P. 1258–1264.

5. Grewal M.S., Andrews A., Bartone C.G. Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration. – John Wiley & Sons, 2013.

6. International Cloud Climatology Project: site. – URL: <http://isccp.giss.nasa.gov> (дата обращения: 13.01.2016).

7. Jarraud M. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation // WMO. – № 8. – Geneva: World Meteorological Organisation, 2008.

8. Kampfner N. Monitoring Atmospheric Water Vapour: Ground-Based Remote Sensing and In-situ Methods // International Space Science Institute, Bern (Switzerland), ISSI Scientific Reports Series. – 2012. – Vol. 10.

9. Kelkar R. R. Satellite Meteorology. – Hyderabad: BS Publications, 2007.

10. NOAA Earth System Research Laboratory: site. – URL: <http://www.esrl.noaa.gov> (дата обращения: 13.01.2016).

11. Raschke E. Radiation and water in the climate system – remote measurements. NATO ASI Series // Series I: Global Environmental Change. – 1996. – Vol. 45.

12. Ware R., et al. GPS sounding of the atmosphere from low Earth orbit: Preliminary results // Bulletin of the American Meteorological Society. – 1996. – Vol.77, № 1. – P. 19–40.

13. Westwater E.R., et al. Principles of Surface-based Microwave and Millimeter wave Radiometric Remote Sensing of the Troposphere // Quaderni della Società Italiana di Elettromagnetismo. – 2005. – Vol.1, № 3. – P. 50–90.