

Влагосодержание атмосферы как климатообразующий фактор

В. Н. Малинин, С. М. Гордеева, Л. М. Наумов

*Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург, 192007, Россия
E-mail: malinin@rshu.ru*

Статья посвящена изучению крупномасштабной изменчивости влагосодержания атмосферы над Мировым океаном и её взаимосвязи с температурой воздуха в приповерхностном слое океана. Приводятся оценки трендов влагосодержания атмосферы, компонентов вертикального влагообмена и температуры воздуха над всем Мировым океаном за 1988–2016 гг. Показана тесная взаимосвязь влагосодержания атмосферы с температурой воздуха. С ростом температуры на 1 °С влагосодержание увеличивается на 10 %, что не соответствует уравнению Клаузиуса–Клапейрона. Приводятся безразмерные оценки трендов характеристик глобальной системы «океан–атмосфера». Установлено, что трендовые изменения влагосодержания зависят преимущественно от вертикального влагообмена океана с атмосферой, а не от глобального потепления. Делается вывод, что поскольку влагосодержание через парниковый эффект оказывает существенное влияние на изменчивость температуры воздуха, его следует рассматривать как климатообразующий фактор, который играет заметную роль в формировании современного глобального потепления.

Ключевые слова: влагосодержание атмосферы, температура воздуха, парниковый эффект, глобальное потепление, статистические модели

Одобрена к печати: 18.05.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251

Введение

В течение многих десятилетий изучению интегрального влагосодержания атмосферы (*ВА*) уделялось относительно мало внимания. Дело в том, что *ВА* имеет сравнительно небольшую изменчивость, а его частная производная является малой величиной по сравнению с другими компонентами, входящими в уравнение водного баланса атмосферы: осадками, испарением, дивергенцией горизонтального переноса влаги. Но ситуация резко изменилась, когда было достоверно установлено, что именно водяной пар является основным парниковым газом. Его вклад в парниковый эффект (*ПЭ*) по современным данным оценивается в 50 %, вклад облачности — в 25 %, а вклад CO_2 — только в 20 % (Schmidt et al., 2010). Но если *ВА* вносит основной вклад в *ПЭ*, то его климатообразующая роль становится очевидной. Однако это не стало очевидным для экспертов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), по сути, определяющим научную политику в области изучения климата за рубежом.

Несмотря на то что в Первом отчёте МГЭИК в 1990 г. (IPCC..., 1990) отмечается доминирующая роль водяного пара в формировании *ПЭ*, одновременно утверждается, что концентрация влаги в атмосфере полностью определяется внутренними свойствами климатической системы и делается следующий вывод: «...глобальное потепление — это, конечно же, результат CO_2 , являющегося парниковым газом». Однако после признания того факта, что именно водяной пар является основным парниковым газом, с каждым новым отчётом всё больший акцент делался на антропогенный характер глобального потепления. В Четвёртом отчёте МГЭИК (IPCC..., 2007) уже отчётливо обозначается причина, по которой водяной пар не учитывается как климатообразующий фактор. Она состоит в том, что «*прямые выбросы водяного пара от антропогенной деятельности создают пренебрежимо малый вклад в радиационный форсинг*». При этом эксперты МГЭИК указывают, что «*увеличение концентрации водяного пара является ключевым следствием, но не причиной процесса глобального потепления и, следовательно, полностью обусловлено положительной обратной связью между ними*». Отсюда

становится понятным, что полностью игнорируются изменения BA за счёт естественных причин, а именно вариабельности компонентов водного баланса атмосферы. Наконец, в Пятом отчёте (IPCC..., 2013) утверждается, что следует учитывать лишь стратосферный водяной пар, который образуется в результате химических реакций из метана. Естественно, вклад его в $PЭ$ ничтожно мал. Итак, последовательно раскручивая антропогенный маховик влияния на климат, в последнем на сегодняшний день Пятом отчёте эксперты МГЭИК делают следующий вывод: «...в высшей степени вероятно (*extremely likely*, 95–100 %), что влияние человека является доминирующей причиной наблюдаемого потепления с середины XX столетия», т.е. полностью игнорируют естественные факторы. Однако с этим утверждением нельзя согласиться. Поэтому цель данной работы состоит в том, чтобы показать, что водяной пар является не только следствием процесса глобального потепления, но и его причиной.

Исходные данные

В данной работе использовались следующие архивы реанализа:

- архив PMWC (Passive Microwave Water Cycle Dataset) V.01b, рассчитанный в рамках программы NASA Energy and Water Cycle Study (NEW) компании Remote Sensing Systems (REMSS) (Hilburn, 2009);
- архив NCEP–DOE Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) reanalysis (Reanalysis-2) (Kanamitsu et al., 2002).

Архив PMWC содержит данные об интегральном влагосодержании атмосферы, полученные с помощью спутниковых датчиков для получения изображений в микроволновом диапазоне SSM/I и SSMIS компании RSS, с использованием единого, физически обоснованного алгоритма пересчёта яркостной температуры в физические параметры (версия 7). Каталог (ftp://ftp.remss.com/vapor/monthly_1deg/) содержит набор среднемесячных значений BA в сетке $1 \times 1^\circ$ с 1988 г. и постоянно обновляется. Дополнительно в нём представлены усреднённые для всего Мирового океана (далее «глобальные») аномалии среднемесячных значений BA . Отметим, что предварительно выполнялось усреднение среднемесячных полей в пятиградусные «квадраты». После этого осуществлялось усреднение по пятиградусным широтным зонам океана и акватории Мирового океана в целом.

Архив NCEP–DOE является продолжением «50-летнего» проекта (с 1948 г. по настоящее время) NCEP–NCAR Reanalysis, охватывает спутниковый период с 1979 г. по настоящее время и использует обновлённые модели прогноза, ассимиляции данных, улучшенные диагностические результаты, в том числе исправления ошибок обработки, выявленных в NCEP–NCAR Reanalysis. В проекте Reanalysis-2 сделаны значительные уточнения в параметрах потоков для суши и океана у земной поверхности. Данные NCEP/NCAR Reanalysis-2 находятся в свободном доступе по адресу <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.gaussian.html>. Из этого архива выбирались среднемесячные значения полей испарения, осадков, температуры воздуха в приводном слое и температуры поверхностного слоя воды в узлах гауссовой географической сетки ($1,875 \times 1,904^\circ$) для открытой водной поверхности океана. Важно, что характеристики указанных архивов являются независимыми по отношению друг к другу. С использованием данных архивов выполнен расчёт указанных выше характеристик для глобальной системы «океан – атмосфера» за период 1988–2016 гг.

О взаимосвязи влагосодержания атмосферы и температуры воздуха в приводном слое над океаном

Известно, что между значениями BA и температурой воздуха ($TВ$) в приводном слое атмосферы существует хорошо выраженная взаимосвязь. Иллюстрацией этого служит *рис. 1* (см. с.245), на котором приводится график связи годовых значений BA и $TВ$, усреднённых для пятиградусных квадратов океана в северном и южном полушариях.

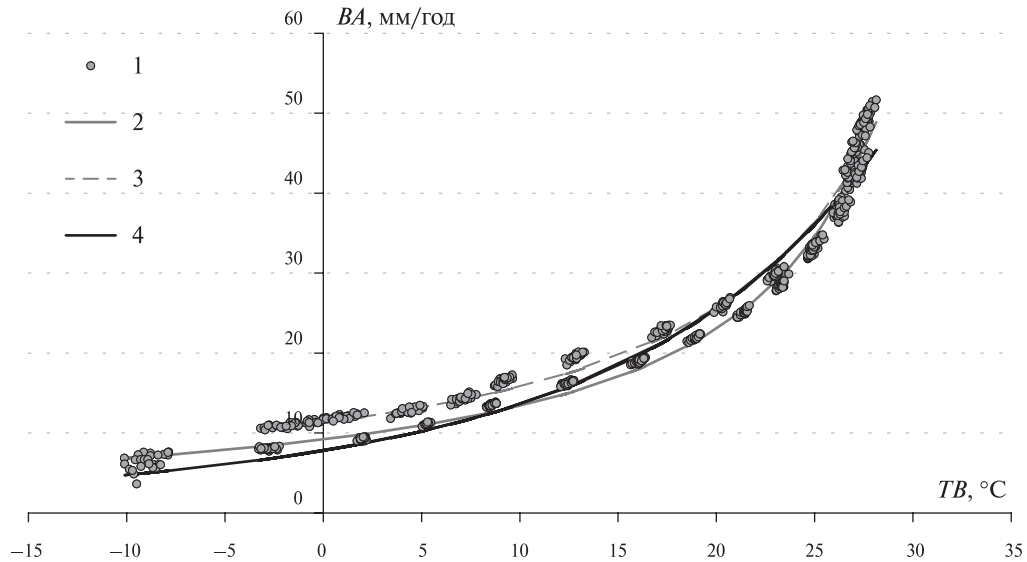


Рис. 1. Зависимости между усреднёнными по пятиградусным квадратам океана годовыми значениями BA и TB (1) для южного (2) и северного (3) полушарий за период 1988–2016 гг. и связь между климатологическими данными BA и TB (4) для широтных зон всего Мирового океана, рассчитанная по полуэмпирической формуле, предложенной в работе (Малинин, 1994)

На графике видно, что для высоких и умеренных широт BA в северном полушарии несколько выше, чем в южном полушарии.

Наиболее точно зависимости между BA и TB аппроксимируются логистической формулой вида:

$$BA = \frac{a}{1 + be^{-cTB}}. \quad (1)$$

Коэффициенты и статистические параметры этой формулы даны в табл. 1. Нетрудно видеть высокую точность аппроксимации, в результате чего ошибка расчёта BA является малой — 1,0...1,5 мм/год. Кроме того, на рис. 1 даётся кривая зависимости BA от TB для пятиградусных зон МО, рассчитанная по формуле $BA = 7,8 \cdot 10^{3,83TB/(169 - TB)}$, которая была получена в 1994 г. (Малинин, 1994) и описывает связь климатологических данных BA и TB . Малое расхождение этой зависимости с двумя другими проявляется лишь в высоких широтах. Итак, несмотря на значительные изменения в климате, связь между TB и BA осталась на прежнем уровне.

Таблица 1. Оценки коэффициентов и статистических параметров в зависимости (1)

Полушарие	Коэффициенты модели			Коэффициент детерминации	Ошибка модели, мм/год
	a	b	c		
Северное	-2,50	-1,22	0,0053	0,98	1,5
Южное	3,33	-1,36	0,0087	0,99	1,0

Обратимся теперь к рис. 2 (см. с. 246), на котором представлено сопоставление средних годовых значений BA и TB , усреднённых для Мирового океана (МО) в целом за период 1988–2016 гг. Нетрудно видеть, что между ними отмечается очень высокая линейная корреляция ($r = 0,95$). Линейное уравнение регрессии между $BA_{\text{МО}}$ и $TB_{\text{МО}}$, рассчитанное методом наименьших квадратов, имеет вид:

$$BA_{\text{МО}} = 2,813TB_{\text{МО}} - 19,9. \quad (2)$$

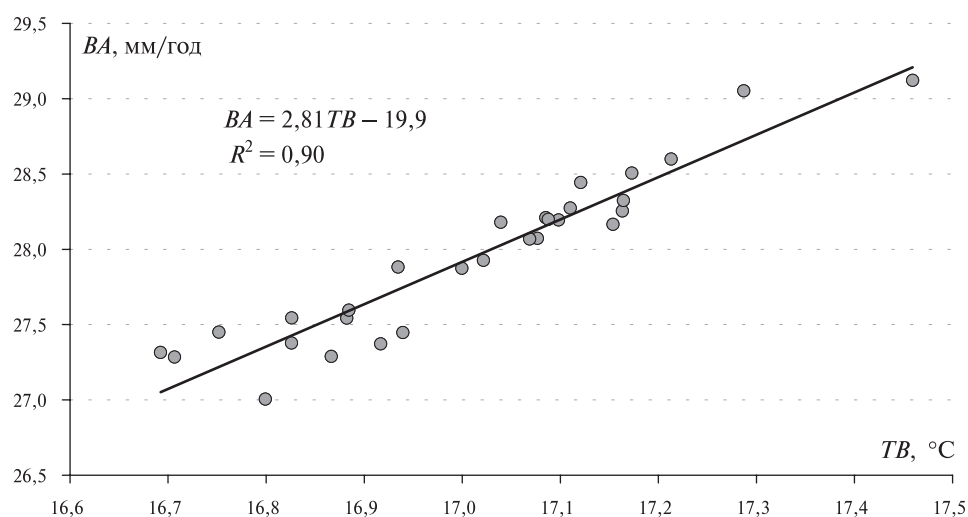


Рис. 2. График статистической связи между средними годовыми значениями VA и TB над Мировым океаном за период 1988–2016 гг.

Коэффициент детерминации этого уравнения $R^2 = 0,90$, а средняя квадратическая ошибка оценки влагосодержания атмосферы $\sigma_{VA} = 0,17$ мм, т. е. является малой величиной. Из данной формулы видно, что при повышении TB на один градус VA растёт на 2,8 мм или на 10 %.

Однако известно, что корреляция показывает только силу связи, а не причинно-следственный характер связи между переменными. Поэтому, исходя из уравнения (2), нельзя утверждать об одностороннем влиянии TB через положительную обратную связь на VA . В действительности, поскольку главный парниковый газ — это водяной пар, сложно утверждать, что является причиной, а что — следствием. С одной стороны, с повышением глобальной температуры воздуха происходит повышение влагоёмкости атмосферы и некоторый рост VA , а с другой — рост VA через парниковый эффект неминуемо ведёт к росту температуры воздуха.

Влагосодержание атмосферы и парниковый эффект

В общем случае парниковый эффект можно представить суммой природной и антропогенной компонент, т. е. $ПЭ = ПЭ_{\text{прир}} + ПЭ_{\text{антр}}$. Естественный $ПЭ$ вызван рядом природных факторов: процессами крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы, а также извержениями вулканов, вследствие чего в атмосферу выбрасывается значительное количество CO_2 и других парниковых газов. Антропогенный $ПЭ$ обусловлен выбросами в атмосферу CO_2 и других газов за счёт различных видов человеческой деятельности. Вследствие сильной турбулентности и значительных скоростей движения воздушных масс происходит быстрое перемешивание атмосферных примесей, в том числе парниковых газов различного происхождения. Полное перемешивание в атмосфере в глобальном масштабе происходит оценочно примерно за неделю. Очевидно, что в настоящее время *корректное разделение $ПЭ$ на естественную и антропогенную компоненту вряд ли возможно*. Однако, по мнению экспертов МГЭИК, антропогенный $ПЭ$ доминирует. Главный аргумент — экспоненциальный рост выбросов в атмосферу углекислого газа, который создаёт $ПЭ$. Благодаря $ПЭ$ происходит рост температуры воздуха, которая в результате наличия положительной обратной связи с водяным паром вызывает повышение его содержания в атмосфере. В качестве доказательства, что водяной пар является лишь ключевым следствием, но не причиной процесса глобального потепления, обычно делается ссылка на уравнение Клаузиуса — Клапейрона (УКК), которое связывает насыщающую упругость водяного пара с температурой воздуха.

Действительно, из этого уравнения следует, что при повышении средней глобальной температуры воздуха ($14^\circ C$) на один градус насыщающая упругость водяного пара повышается

на 6,5 % (Brutsaert, 2017; O’Gorman, Muller, 2010). Но следует понимать, что УКК является чисто термодинамическим и не описывает реальную турбулентную атмосферу. Кроме того, насыщающая упругость водяного пара — это не эквивалент BA . Даже в предположении одностороннего влияния TB на BA из уравнения (2) следует, что при повышении TB_{MO} на один градус BA_{MO} повышается на 10 %, что не соответствует УКК.

Следует также иметь в виду, что формирование BA происходит в результате вертикального влагообмена атмосферы с океанической поверхностью. Запишем уравнение водного баланса атмосферы в виде:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}F = E - P. \quad (3)$$

Здесь W — влагосодержание атмосферы; F — вертикально-интегрированный горизонтальный полный поток водяного пара; $E - P$ — эффективное испарение. Величина $\text{div}F$, исходя из теоремы Остроградского — Гаусса, интерпретируется как разность между выносом атмосферной влаги за пределы рассматриваемой территории и её вносом вглубь этой территории. Если рассматривать Мировой океан в целом, то $\text{div}F$ означает результирующий вынос водяного пара с океана на континенты. При осреднении уравнения (3) для земного шара $\text{div}F = 0$. Итак, изменения BA в соответствии с уравнением глобального атмосферного баланса влаги определяются исключительно разностью глобальных величин испарения и осадков или, в первом приближении, разностью испарения и осадков над Мировым океаном. Именно это игнорируется экспертами МГЭИК.

Рассмотрим теперь линейные тренды для компонентов влагообмена глобальной системы «океан — атмосфера» совместно с температурой воздуха приземного слоя и температурой поверхностного слоя воды (ТПО). Но поскольку эти характеристики имеют разную размерность, то предварительно приведём тренды к безразмерному виду. С этой целью был рассчитан индекс тренда (табл. 2), представляющий собой отношение размаха тренда к его среднему значению и выражаемый в процентах (Малинин, Гордеева, 2015), т. е. $I_{\text{тр}} = 100 a_1 n / X_{\text{ср}}$. Здесь a_1 — угловой коэффициент; n — длина временного ряда; $X_{\text{ср}}$ — среднее значение тренда. По сути, индекс тренда — некий аналог коэффициента вариации, используемого для сравнения изменчивости характеристик, имеющих разную размерность.

Таблица 2. Оценки уравнений трендов, коэффициентов детерминации и индекса тренда для характеристик глобальной системы «океан — атмосфера» за период 1988–2016 гг.

Характеристика	Уравнение тренда	Коэффициент детерминации R^2	Индекс тренда, %
BA	$0,057t + 27,09$	0,82	5,91
TB	$0,018t + 16,74$	0,72	3,07
$ТПО$	$0,017t + 17,19$	0,71	2,83
E	$0,286t + 132,8$	0,51	6,05
P	$0,403t + 122,7$	0,58	9,08
$E-P$	$-0,116t + 10,12$	0,62	40,1

Как видно из табл. 2, максимальный коэффициент детерминации отмечается для BA , а наименьший — для испарения. Если не принимать во внимание эффективное испарение, для которого большая величина $I_{\text{тр}}$ в определённой степени может быть обусловлена малым средним значением, то индекс тренда максимален для осадков (9,0 %), почти одинаков для испарения и влагосодержания (6,0 и 5,9 %) и минимален для $ТПО$ и TB (2,8 и 3,1 %). Если даже предположить, что должно отмечаться полное соответствие линейных трендов в TB и BA , то и в этом случае практически половина индекса тренда BA (2,8 %) остаётся не описанной изменениями в TB . В тоже время, как видно из табл. 2, компоненты влагообмена (испарение и осадки) могут полностью формировать тренд в BA .

На рис. 3 даётся более подробный анализ динамики индексов тренда для *ВА* и *ТВ*. До 2012 г. расхождение между ними практически постоянно и равно 2,1 %. Однако в последние четыре года в результате ускорения роста *ВА* индекс тренда начинает повышаться более быстрыми темпами по сравнению с индексом тренда для *ТВ*, вследствие чего расхождение достигает 2,8 %. Кроме того, повышение индекса тренда для *ВА* начинается с 2013 г., а для *ТВ* — с 2014 г., т. е. именно ускорение роста *ВА* стимулирует ускорение роста *ТВ*, а не наоборот. Очевидно, что такое повышение тренда во влагосодержании атмосферы не может быть обусловлено температурой воздуха. Поэтому вполне определённо можно утверждать, что *долговременные (трендовые) изменения ВА зависят преимущественно от вертикального влагообмена океана с атмосферой, а не от глобального потепления.*

На рис. 4 приводится межгодовой ход *ВА* и эффективного испарения (*E–P*) для Мирового океана за период 1988–2016 гг. Из рис. 4 видно, что эффективное испарение имеет сильный отрицательный тренд ($Tr = -0,75$ мм/10 лет). Согласно тренду оно уменьшилось за рассматриваемый период на 3,3 см. *ВА* за этот же период увеличилось на 1,6 мм. Отсюда следует, что долговременные изменения *ВА* могут быть обусловлены только изменениями компонентов влагообмена океана с атмосферой и не связаны с глобальной температурой воздуха.

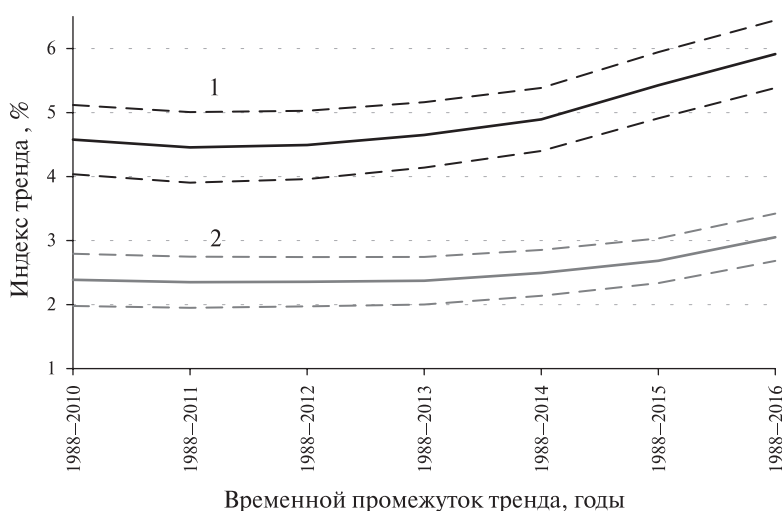


Рис. 3. Межгодовая изменчивость индексов тренда влагосодержания атмосферы (1) и температуры воздуха (2) над Мировым океаном с 1988–2010 гг. по 1988–2016 гг. Пунктирными линиями отмечены стандартные ошибки оценки тренда

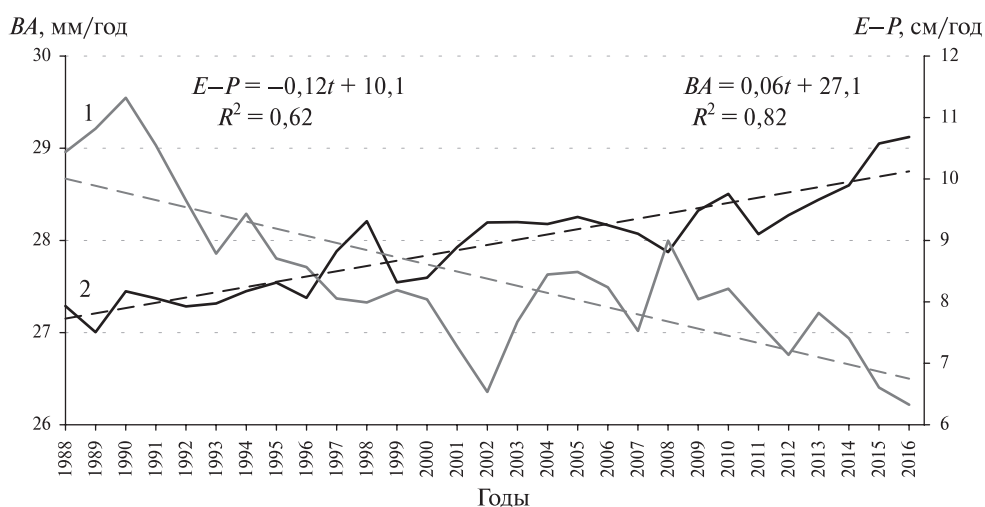


Рис. 4. Межгодовой ход эффективного испарения (1) и влагосодержания атмосферы (2) над Мировым океаном за 1988–2016 гг.

Однако в действительности оба процесса влияют на изменения VA одновременно. И поскольку полное обновление водяного пара в атмосфере происходит примерно за восемь суток, то разделить их вклад в дисперсию VA практически нереально.

Итак, полученные результаты полностью опровергают вывод экспертов МГЭИК (IPCC..., 2007) о том, что «...увеличение концентрации водяного пара является ключевым следствием, но не причиной процесса глобального потепления и, следовательно, полностью обусловлено положительной обратной связью между ними». В действительности, VA следует рассматривать как климатообразующий фактор, который играет заметную роль в формировании современного глобального потепления.

В современных условиях температура воздуха, теплосодержание океана, испарение, влагосодержание атмосферы, концентрация CO_2 , ледовитость полярных районов, изменения альбедо, уровень Мирового океана изменяются согласованно, причём изменения одного из этих компонентов через обратные связи в системе «океан – атмосфера» вызывают изменения других. Поэтому формирование глобального потепления обусловлено не антропогенной деятельностью, а процессами крупномасштабного взаимодействия между океаном и атмосферой и регулируется системой положительных и отрицательных обратных связей, причём положительные связи преобладают. Главенствующая роль в этом принадлежит обратной положительной связи между температурой воздуха и влагосодержанием. При этом сложно утверждать, что является причиной, а что — следствием (Малинин, 2015).

Кроме того, следует иметь в виду, что рост концентрации CO_2 и VA происходит согласованно и в одной фазе, поэтому их воздействие на TB осуществляется совместно. Определить, какой из этих парниковых газов оказывается «главным» по влиянию на TB , вряд ли возможно. Отсюда следует определённый дуализм в «поведении» атмосферного водяного пара, который является не только откликом на изменения климата, но и в определённой степени климатообразующим фактором. Однако если бы не было дополнительного углекислого «покрывала» в атмосфере, формирующегося за счёт антропогенной деятельности, то климатическая система испытывала бы циклические колебания, как это было в доиндустриальный период. Последний пример такого колебания — 60-летний цикл, в соответствии с которым после 2000 г. должен был наступить период относительного похолодания. Но он не наступил, поскольку рост концентрации CO_2 — это фактор усиления обратной положительной связи между температурой воздуха и влагосодержанием, не допускающий движения климатической системы в сторону похолодания.

Заключение

Выполненные в работе расчёты показали, что при повышении $TB_{мо}$ на один градус $VA_{мо}$ повышается на 10 %, что не соответствует уравнению Клаузиуса – Клапейрона, которое, по мнению экспертов МГЭИК, доказывает, что увеличение концентрации водяного пара является ключевым следствием, но не причиной процесса глобального потепления и, следовательно, полностью обусловлено положительной обратной связью между ними. Но поскольку главный парниковый газ — это водяной пар, то сложно утверждать, что является причиной, а что — следствием. С одной стороны, с повышением глобальной температуры воздуха происходит некоторый рост VA , а с другой — рост VA через парниковый эффект неминуемо ведёт к росту температуры воздуха.

Показано, что безразмерный индекс тренда $VA_{мо}$ (5,9 %) почти в два раза выше аналогичного индекса тренда в $TB_{мо}$ (3,1 %). В последние четыре года в результате ускорения роста VA индекс тренда начинает повышаться более быстрыми темпами по сравнению с индексом тренда для TB . При этом повышение индекса тренда для VA начинается с 2013 г., а для TB — с 2014 г., т.е. именно ускорение роста VA стимулирует ускорение роста TB , а не наоборот. Очевидно, что такое повышение тренда во влагосодержании атмосферы не может быть обусловлено температурой воздуха. Поэтому долговременные изменения VA зависят в основном от влагообмена океана с атмосферой, а не от глобального потепления.

Полученные результаты позволяют рассматривать *ВА* как климатообразующий фактор, который играет заметную роль в формировании современного глобального потепления. Можно утверждать, что формирование глобального потепления обусловлено не антропогенной деятельностью, а процессами крупномасштабного взаимодействия между океаном и атмосферой и регулируется системой положительных и отрицательных обратных связей, причём положительные связи преобладают. Главенствующая роль в этом принадлежит обратной положительной связи между температурой воздуха и влагосодержанием. При этом повышение концентрации CO_2 в глобальном потеплении можно рассматривать как фактор усиления обратной положительной связи между температурой воздуха и влагосодержанием, не допускающий движения климатической системы в сторону похолодания.

Литература

1. Малинин В. Н. Влагообмен в системе океан-атмосфера. Л.: Гидрометеиздат, 1994. 197 с.
2. Малинин В. Н. Изменения уровня Мирового океана и климата // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 41. С. 100–115.
3. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Изменчивость влагосодержания атмосферы над океаном по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 3–11.
4. Brutsaert W. Global land surface evaporation trend during the past half century: Corroboration by Clausius–Clapeyron scaling // Advances in Water Resources. 2017. V. 106. P. 3–5.
5. Hilburn K. A. The Passive Microwave Water Cycle Product. REMSS Tech. Rpt. 072409. 2009. P. 1–30.
6. IPCC. Climate Change 1990: The IPCC Scientific Assessment. Report prepared for IPCC by Working Group I / eds. J. T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraums. Cambridge, N. Y., Melbourne: Cambridge University Press, 1990. 410 p.
7. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller. Cambridge, N. Y.: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
8. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley. Cambridge, N. Y.: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
9. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.-K., Hnilo J. J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // Bull. American Meteorological Society. 2002. V. 83. P. 1631–1643.
10. O’Gorman P. A., Muller C. J. How closely do changes in surface and column water vapor follow Clausius–Clapeyron scaling in climate change simulations? // Environmental Research Letters. 2010. V. 5. No. 2. P. 025207.
11. Schmidt G. A., Ruedy R. A., Miller R. L., Lacis A. A. Attribution of the present-day total greenhouse effect // J. Geophysical Research. 2010. V. 115. Iss. D20. P. 2156–2202.

Total precipitable water of the atmosphere as a climate forcing factor

V. N. Malinin, S. M. Gordeeva, L. M. Naumov

*Russian State Hydrometeorological University
Saint Petersburg 192007, Russia
E-mail: malinin@rshu.ru*

The work is devoted to the study of large-scale variability of the total precipitable water over the world ocean and its relationship with the air temperature on the surface layer of the ocean. Trend estimates of the total precipitable water, the vertical moisture exchange components and the air temperature over

the world ocean for 1988–2016 period are given. A close relationship between the total precipitable water and the air temperature is shown. With the increase in temperature by 1 °C the moisture content increases by 10 %, which does not correspond to the Clausius –Clapeyron equation. With the increase in the global air temperature there is some increase in the moisture content, but since the water vapor is the main greenhouse gas its growth through the greenhouse effect inevitably leads to increase in the air temperature. Dimensionless estimates of trends of the global ocean-atmosphere system characteristics are given. It is determined that trend changes in the total precipitable water depend on vertical moisture exchange of ocean and the atmosphere, rather than on the global warming. It is concluded that as the total precipitable water has a significant effect on variability of the air temperature through the greenhouse effect, it should be regarded as a climate forcing playing a significant role in formation of the modern global warming.

Keywords: total precipitable water, air temperature, greenhouse effect, global warming, statistical models

Accepted: 18.05.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251

References

1. Malinin V. N., *Vlagoobmen v sisteme okean-atmosfera* (Moisture exchange in the ocean-atmosphere system), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1994, 197 p.
2. Malinin V. N., *Izmeneniya urovnya Mirovogo okeana i klimata* (Global sea level and climate variation), *Proceedings of RSHU*, 2015, No. 41, pp. 100–115.
3. Malinin V. N., Gordeeva S. M., *Izmenchivost' vlagosoderzhaniya atmosfery nad okeanom po sputnikovym dannym* (Variability of atmospheric water vapor over the ocean according to satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 1, pp. 3–11.
4. Brutsaert W., Global land surface evaporation trend during the past half century: Corroboration by Clausius – Clapeyron scaling, *Advances in Water Resources*, 2017, Vol. 106, pp. 3–5.
5. Hilburn K. A., The Passive Microwave Water Cycle Product, *REMSS Tech. Rpt. 072409*, 2009, pp. 1–30.
6. *IPCC. Climate Change 1990: The IPCC Scientific Assessment. Report prepared for IPCC by Working Group I.*, J. T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraums (eds.), Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press, 1990, 410 p.
7. *IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller (eds.), Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007, 996 p.
8. *IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.), Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p.
9. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.-K., Hnilo J. J., Fiorino M., Potter G. L., NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2), *Bull. American Meteorological Society*, 2002, No. 83, pp. 1631–1643.
10. O’Gorman P. A., Muller C. J., How closely do changes in surface and column water vapor follow Clausius – Clapeyron scaling in climate change simulations? *Environmental Research Letters*, 2010, Vol. 5, No. 2, p. 025207.
11. Schmidt G. A., Ruedy R. A., Miller R. L., Lacis A. A., Attribution of the present-day total greenhouse effect, *J. Geoph. Res.*, 2010, Vol. 115, Issue D20, pp. 2156–2202.