

УДК 551.583

РОЛЬ ОКЕАНА В ИЗМЕНЕНИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО И РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА

С.А. ЛЫСЕНКО, В.Ф. ЛОГИНОВ

Институт природопользования НАН Беларуси, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 2 ноября 2018

Аннотация. Исследованы внешние и внутренние климатообразующие факторы. Мировой океан рассматривается как главный модулятор современных естественных изменений климата в контексте его влияния на испарение в атмосферу и формирование облаков. Особое внимание уделено исследованию процессов замедления темпов роста среднеглобальной температуры. На основе данных дистанционного зондирования Земли и компьютерного моделирования показана тесная связь глобального и регионального климата с аномалиями температуры в тропической зоне Тихого океана. Установлены связанные с океаном индексы, позволяющие с заблаговременностью в полгода предсказывать экстремальность климата Беларуси в летние месяцы.

Ключевые слова: климат, океан, водяной пар, облака, атмосферная радиация.

Abstract. External and internal climate-forming factors were examined. World Ocean was considered as the main modulator of modern natural climate change in the context of the effect on the evaporation in atmosphere and cloud formation. Special attention was paid to the investigation of processes of decrease in average global temperature growth rate. On the base of the Earth remote sensing data and computer modelling close connection between global and regional climate and temperature anomalies in the Tropic Pacific was shown. It was established ocean-based indexes that allow to forecast the extremeness of climate of Belarus in summer months with half a year in advance.

Keywords: climate, ocean, water vapor, clouds, atmosphere radiation.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 117, No. 7, pp. 58-63
Role of the ocean in global and regional climate change
S.A. Lysenko, V.F. Loginov

Введение

Проблема климатических изменений затрагивает многочисленные сферы экономики и международной безопасности и поэтому находится в центре пристального внимания мирового сообщества. В последние годы интенсивно разворачивается система глобального мониторинга окружающей среды, особенно в части дистанционного зондирования атмосферы, океана, криосферы и биосферы. С развитием физических основ прогнозирования и технических возможностей увеличивается оправдываемость кратковременных прогнозов погоды и климата. Однако уровень научного понимания процессов и явлений, развивающихся в климатической системе, все еще нельзя признать достаточным, а вопрос причинности современных изменений климата до настоящего времени остается «альфой и омегой» современной климатологии.

Во временной динамике среднегодовой температуры поверхности Земли отчетливо выделяются паузы и периоды замедления темпов глобального потепления, длящиеся более десяти лет. В последний раз рост глобальной температуры Земли замедлялся с 1998 по 2014 годы. Для объяснения этого явления выдвинуто множество теорий, опирающихся

на данные наблюдений и компьютерного моделирования. Наиболее обоснованными и убедительными представляются гипотезы о влиянии на климат многолетних периодических изменений температуры океана и его циркуляции. Однако вопрос о механизме этого влияния океана остается дискуссионным и требует тщательного изучения.

Среди наиболее значимых факторов, определяющих короткопериодные флуктуации климата, особое место занимают водяной пар и облачность, свойства которых модулируются посредством испарения с поверхности океана и суши. В настоящей работе дается объяснение важных особенностей в изменении современного климата с точки зрения естественных механизмов формирования и трансформации водяного пара в атмосфере. В первую очередь это относится к результатам исследований пауз и скачков разной продолжительности, наблюдаемых на фоне восходящей трендовой составляющей в изменении климата.

Исследование термодинамики атмосферы и океана

Для понимания причин многолетних изменений содержания водяного пара в атмосфере полезно рассмотреть тенденции изменений температуры и приповерхностной скорости ветра в различных районах Мирового океана. Такое рассмотрение проведено с использованием следующих комплектов данных:

- температура поверхности моря (SST, Sea Surface Temperature), измеряемая тепловым спектрометрическим ATSR (Along Track Scanning Radiometer);
- аномалии высоты уровня моря (SLH, Sea Level Height) и ее составляющие (температурно-обусловленная и массовая), измеряемые в рамках глобальных спутниковых экспериментов AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data) и GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment);
- общее содержание водяного пара в столбе атмосферы (TCWV, Total Column Water Vapor), восстанавливаемое по данным пассивного зондирования атмосферы спутниковым прибором MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer);
- глобальные поля приповерхностной скорости ветра (TWS, Terrestrial Wind Speed), рассчитанные с использованием модели MERRA-2, иницируемой данными наземных и спутниковых наблюдений за состоянием атмосферы.

Временной ряд глобальных среднемесячных значений TCWV, построенный по данным спутникового прибора MODIS, приведен на рис. 1. Видно, что с 2000 по 2014 годы величина TCWV понижалась практически монотонно со средней скоростью $\sim 0,12$ мм/год. За эти годы уменьшение TCWV составило около 10 % от его среднего по планете значения (22,5 мм).

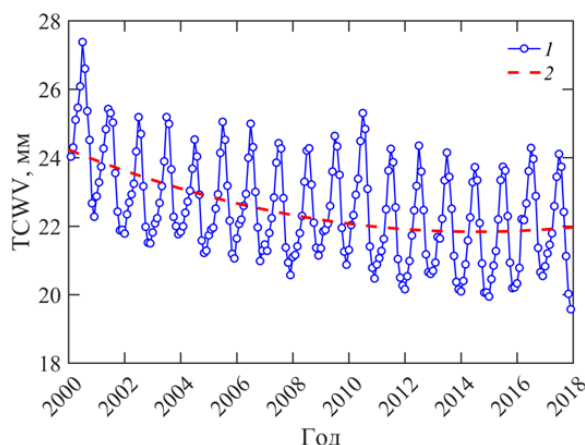


Рис. 1. Динамика (1) и квадратичный тренд (2) среднемесячных глобальных значений общего содержания водяного пара в столбе атмосферы

Влияние температуры поверхности океана на поступление влаги в атмосферу наиболее отчетливо проявляется в летние месяцы, когда содержание водяного пара в атмосфере достигает своего максимума в годовом ходе. Коэффициенты линейных трендов SST, TWS и TCWV для летнего сезона приведены на рис. 2. Схожесть их распределений по поверхности

Мирового океана, говорит о взаимообусловленности процессов перераспределения энергии (в виде скрытой теплоты парообразования) и количества движения между атмосферой и океаном. Вариации средних летних значений SST и TCWV относительно их трендов более чем на половине площади Мирового океана связаны с коэффициентом корреляции $> 0,55$ (рис. 2, *з*). Наиболее значимая корреляция и скорость изменения TCWV ($-0,28$ мм/год) наблюдаются в восточной и центральной зонах Тихого океана, лежащих между -30 и 30° с.ш. Температура поверхности этой зоны океана в годы климатической паузы понижалась со скоростью $-0,026$ °C/год, а тропические ветры усиливались со скоростью $0,032$ м·с⁻¹/год. В целом по планете скорость приповерхностного ветра с 1998 по 2013 год уменьшилась на $0,093$ м/с, однако в тропической зоне Тихого океана и также в циркумполярной зоне Южного океана наблюдался ее статистически значимый рост. Это обстоятельство могло способствовать усилению океанических течений и зональному переносу ими тепла [1–3].

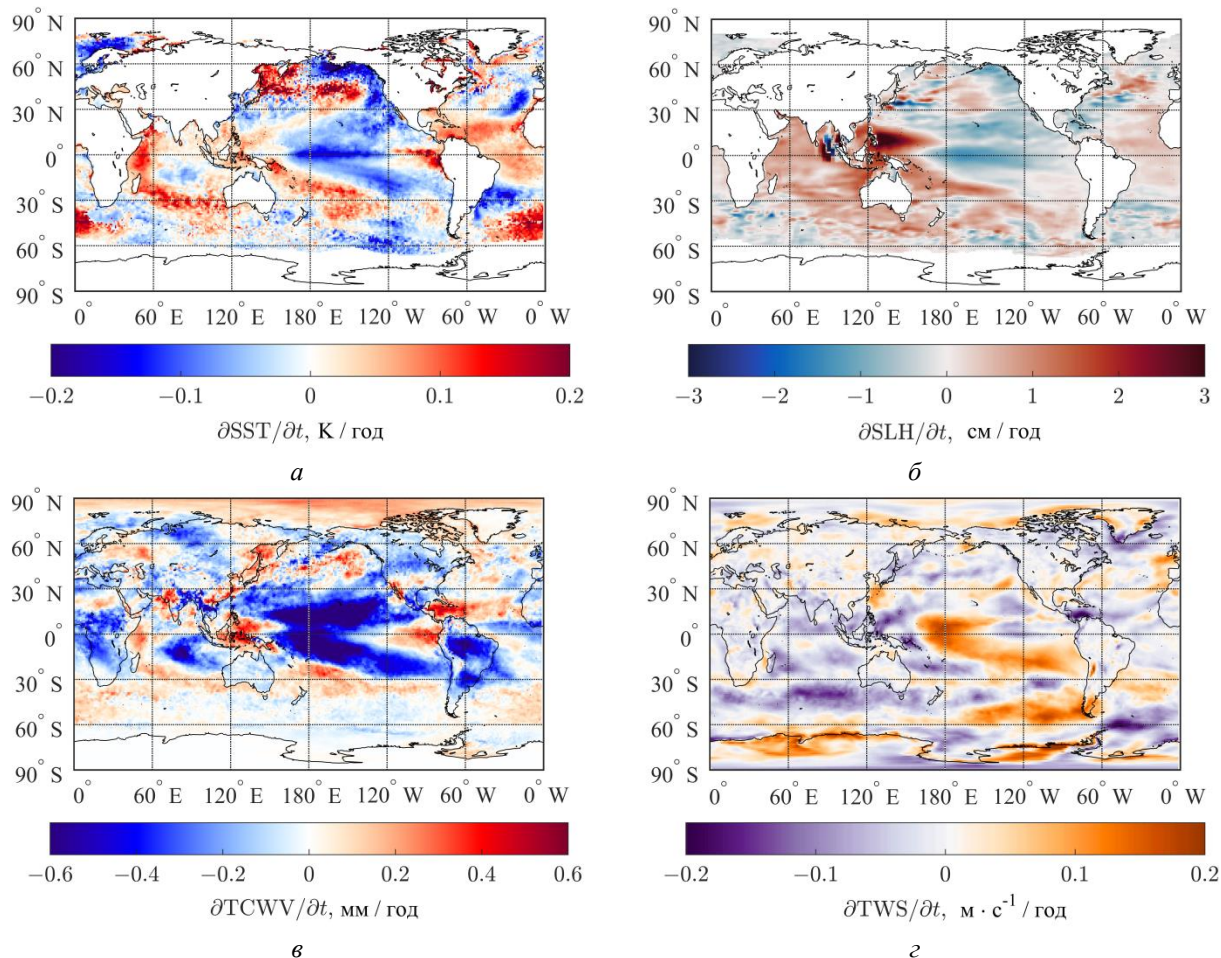


Рис. 2. Глобальные распределения трендов SST (*а*), SLH (*б*), TCWV (*в*) и TWS (*г*) в летние месяцы периода климатической паузы

Представляет интерес количественно оценить влияние изменений температуры поверхности Мирового океана и глобальной скорости ветра на общее содержание водяного пара в атмосфере. Для этого рассмотрим уравнение регрессии между указанными геофизическими параметрами, полученное по данным спутниковых наблюдений и метеорологического реанализа для периода стабилизации глобальной температуры в начале текущего столетия:

$$\text{TCWV} = -153,09 + 6,535 \cdot \text{SST}_{\text{ATSR}} + 6,132 \cdot \text{TWS}. \quad (1)$$

Коэффициент множественной корреляции, описываемой уравнением (1), составляет 0,91. Данное уравнение позволяет оценить чувствительность TCWV к вариациям SST и TWS. На основании этого можно сделать вывод, что трендовая компонента TCWV в годы

климатической паузы на 71 % формировалась за счет охлаждения поверхности Мирового океана ($-0,012$ °С/год) и на 9 % – под влиянием уменьшения глобальной скорости приземного ветра ($-0,0028$ м·с⁻¹/год).

Моделирование радиационного баланса подстилающей поверхности

Теперь оценим, как изменения TCWV в годы климатической паузы отразились на радиационном балансе подстилающей поверхности. Для этого использовалась разработанная авторами модель переноса излучения в системе «атмосфера – подстилающая поверхность». Модель включает в себя отдельные блоки по расчету высотных профилей физических параметров атмосферы (температуры, влажности воздуха, парциальных давлений газовых компонент), оптических характеристик аэрозоля и облаков, газового поглощения и рассеяния, восходящих и нисходящих потоков солнечного и теплового излучения.

Рассмотрим два значения TCWV: 23,5 мм (глобальный средний уровень 2001 г.) и 21,5 мм (2014 г.). Значения других параметров атмосферы, влияющих на ее радиационный режим выбраны следующими: приземная температура воздуха – 18 °С, аэрозольная оптическая толщина – 0,255, концентрация CO₂ – 370,41 ppmv (уровень 2001 г.) и 397,11 ppmv (2014 г.). Концентрации других атмосферных газов и их высотная стратификация приняты в соответствие со стандартной моделью атмосферы для лета средних широт. Температура подстилающей поверхности во всех проводимых расчетах задавалась постоянной – 20 °С. Тип подстилающей поверхности соответствовал зеленой траве с альбедо и излучательной способностью, взятыми из базы данных ASTER [4]. Косинус зенитного угла Солнца задавался равным 0,58, что соответствует его оптимальному значению для расчетов планетарного альбедо [5].

Результаты расчетов приведены в таблице. Видно, что водяной пар влияет на потоки коротковолнового ($\lambda = 0,3-3,0$ мкм) F_{SW} и длинноволнового ($\lambda = 3-100$ мкм) F_{LW} излучений, приходящие на нижнюю границу атмосферы, противоположным образом: в солнечной области спектра он уменьшает пропускание атмосферы и ослабляет приходящую на подстилающую поверхность радиацию, а в тепловом диапазоне длин волн увеличивает эффективную излучательную способность атмосферы, создавая дополнительный парниковый эффект. Уменьшение TCWV с 2001 по 2014 годы снизило приходную часть радиационного баланса подстилающей поверхности примерно на 0,93 Вт/м², что более чем в 11 раз превышает приток к ней длинноволнового излучения за счет увеличения концентрации CO₂ в атмосфере за те же годы.

Оценки радиационных воздействий на подстилающую поверхность в солнечной (shortwave, SW) и тепловой (longwave, LW) областях спектра за счет вариаций содержания водяного пара (δ TCWV) и углекислого газа (δ CO₂) в атмосфере

CO ₂	TCWV, mm	C_{GHG} , ppmv	δ TCWV, mm	δC_{GHG} , ppmv	δF_{SW} , W/m ²	δF_{LW} , W/m ²	δF_{Tot} , W/m ²
0	23,5	370	-2	0	2,887	-3,827	-0,938
0	23,5	397	-2	0	2,851	-3,782	-0,929
0	21,5	370	0	27	-0,136	0,223	0,087
0	23,5	370	0	27	-0,100	0,178	0,078

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: C_{GHG} – концентрация углекислого газа (greenhouse gas), F_{SW} , F_{LW} и F_{Tot} – нисходящие потоки коротковолновой, длинноволновой и полной радиации на нижней границе атмосферы соответственно, δ – абсолютные вариации величин

Очевидно, что при наблюдаемой динамике TCWV в начале 2000-х годов результирующий радиационный форсинг на подстилающую поверхность должен был уменьшаться. Однако в действительности среднегодовая температура планеты в эти годы сохранялась практически постоянной, причем в летние месяцы даже наблюдался ее рост. Это факт можно объяснить косвенными механизмами воздействия водяного пара на климат и, в частности, его взаимодействием с облаками.

Данные спутниковых наблюдений показывают, что оптическая толщина облаков (CO₂, Cloud Optical Thickness) в своей глобальной временной динамике повторяет ход TCWV с коэффициентом корреляции 0,74, но с задержкой в полгода. Наибольшее уменьшение оптической толщины облачного покрова (на величину ~0,031 в год) наблюдается в средних и субполярных районах Северного полушария (рис. 3).

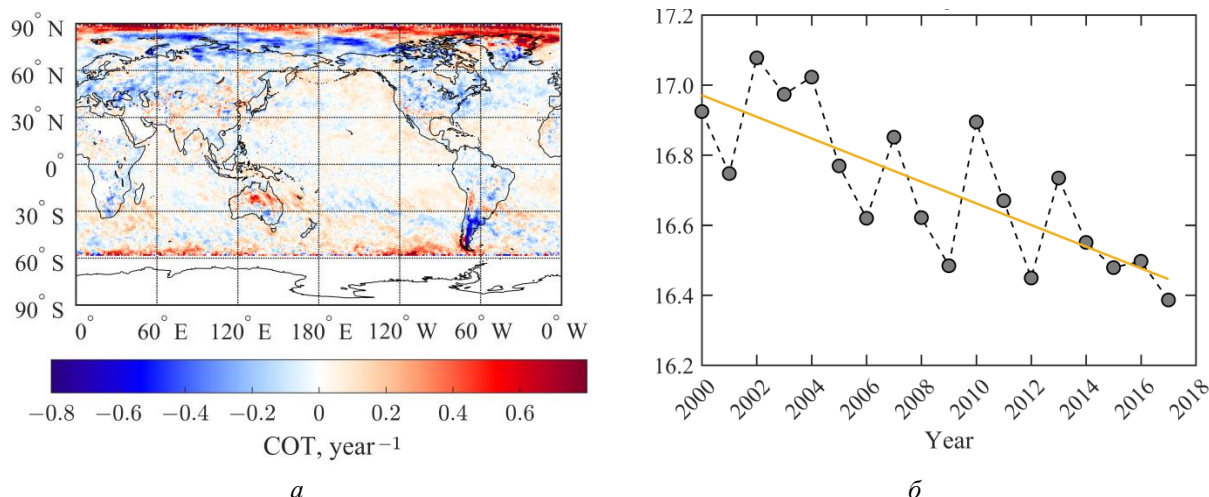


Рис. 3. Глобальное распределение тренда оптической толщины облачности в теплый период года Северного полушария (май–сентябрь) (а), и ее динамика в земном поясе между 30 и 75° с. ш. (б)

Для количественных оценок влияния наблюдаемых изменений COT на радиационный баланс подстилающей поверхности проведены численные расчеты переноса излучения в атмосфере. В качестве опорных значений параметров облаков, используемых в радиационной модели атмосферы, приняты их средние значения для северных широт от 30 до 75° в теплый период года (с мая по сентябрь). Расчеты атмосферной радиации выполнялись для ряда среднегодовых значений оптической толщины облачности, концентраций CO₂ и водяного пара в атмосфере, наблюдаемых с начала текущего столетия.

Смоделированные значения среднегодовых аномалий приповерхностной температуры (с точностью до константы, задающей нулевой уровень) сопоставлены на рис. 4 с данными наблюдений для широтной зоны 30–75° с. ш.

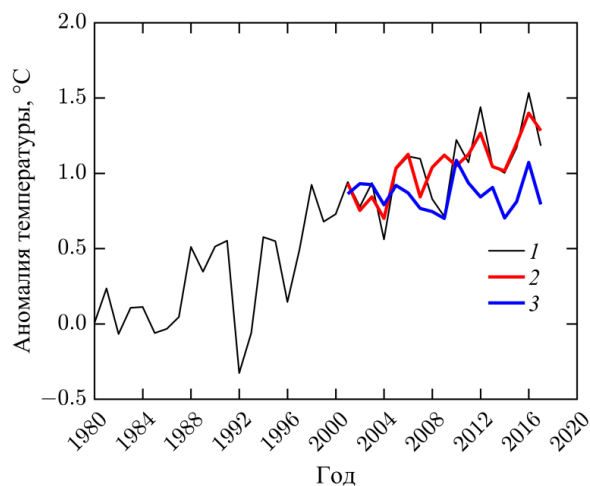


Рис. 4. Наблюдаемая (1) и смоделированная динамика аномалии приземной температуры воздуха в теплый период года для пояса Северного полушария, лежащего между 30 и 75° с. ш., без учета (2) и с учетом (3) изменений оптической толщины облаков

При расчетах радиационного баланса подстилающей поверхности рассмотрено два сценария межгодовой динамики оптической толщины облачности: ее постоянство с 2000 года и изменение в соответствии с данными спутниковых наблюдений, представленными на рис. 3, б. В первом случае модельные расчеты дают практически постоянную температуру с 2000 по 2017 год. Это говорит о том, что в средних и субполярных широтах Северного полушария потепление климата, связанное с антропогенными выбросами CO₂ в атмосферу, практически полностью компенсировалось противоположным по знаку радиационным

эффектом от убывания содержания в атмосфере водяного пара (примерно на 0,043 мм/год для теплого периода года). Во втором случае модельные расчеты достаточно хорошо воспроизводят межгодовую изменчивость приземной температуры и дают ее линейный тренд, практически идентичный наблюдаемому (~0,029 °C/год). При этом положительная величина этого тренда объясняется не эффектами парниковых газов, а динамикой оптической толщины облаков и ослаблением ими солнечного излучения, достигающего земной поверхности.

В зимние месяцы в Северном полушарии поток солнечного излучения минимален, а подстилающая поверхность покрыта снегом и максимально отражает падающее на нее излучение. В этих условиях приток к подстилающей поверхности солнечного излучения, связанный с уменьшением оптической толщины облаков, не компенсирует ее выхолаживание за счет уменьшения парникового эффекта водяного пара. В результате приповерхностная температура воздуха понижалась.

Таким образом, замедление темпов роста температуры Земного шара в начале текущего столетия было результатом противоположно направленных радиационных воздействий на подстилающую поверхность, связанных с естественной и взаимосвязанной динамикой содержания водяного пара в атмосфере и оптической толщины облаков. В Северном полушарии планеты зимние температуры приземного воздуха понижались в результате уменьшения парникового эффекта водяного пара, а летние температуры повышались за счет увеличения пропускания облаками солнечного излучения. В тоже время над Арктическими районами планеты, в полном соответствии с парниковой теорией, содержание водяного пара в атмосфере зимой и летом медленно повышалось (см. рис. 2, в), усиливая потепление воздуха. В результате скорость потепления в Арктике в 1998–2012 гг. составляла примерно 0,0755 °C/год [6], что примерно в шесть раз выше средней скорости потепления на Земле.

Список литературы / References

1. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus / M.H. England [et. al.] // *Nat. Clim. Chang.* 2014. Vol. 4. P. 222–227.
2. Surface warming hiatus caused by increased heat uptake across multiple ocean basins / S.S. Drijfhout [et. al.] // *Geophys. Res. Lett.* 2014. Vol. 41. P. 7868–7874.
3. Chen X., Tung K.-K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration // *Science*. 2014. Vol. 345 (6199). P. 897–903.
4. The ASTER Spectral Library Version 2.0 / A.M. Baldridge [et. al.] // *Remote Sens. Environ.* 2009. Vol. 113. P. 711–715.
5. Cronin T.W. On the Choice of Average Solar Zenith Angle // *J. Atmospheric Sci.* 2014. Vol. 71, № 8. P. 2994–3003.
6. Recently amplified arctic warming has contributed to a continual global warming trend / J. Huang [et. al.] // *Nat. Clim. Chang.* 2017. Vol. 7. P. 875–879.

Сведения об авторах

Лысенко С.А., д.ф.-м.н., заведующий центром климатических исследований – заместитель директора по научной работе ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси».

Логинов В.Ф., д-р географ. наук, академик НАН Беларуси, г.н.с. ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси»

Information about the authors

Lysenko S.A., D.Sci, head of the Center for climate research – deputy director of the Institute for nature management of NAS of Belarus.

Loginov V.F., D.Sci, academician of NAS of Belarus, chief researcher of the Institute for nature management of NAS of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220114, Республика Беларусь,
Минск, ул. Ф. Скорины, 10,
ГНУ «Институт природопользования
НАН Беларуси»,
тел.: +375-17-396-73-98
e-mail: lysenkorfe@gmail.com
Лысенко Сергей Александрович

Address for correspondence

220114, Republic of Belarus,
10, F. Skoryna Str., 220114, Minsk,
Institute for Nature Management of the National
Academy of Sciences of Belarus
tel.: +375-17-396-73-98
e-mail: lysenkorfe@gmail.com
Lysenko Sergey Aleksandrovich