

ОЦЕНКА РОЛИ ТИХОГО ОКЕАНА В ИЗМЕНЕНИЯХ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

© 2019 г. В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко*

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

**e-mail: lysenkorfe@gmail.com*

Поступила в редакцию 22.11.2018 г.; после доработки 23.01.2019 г.; принята в печать 24.01.2019 г.

Исследованы гидротермодинамические процессы в системе атмосфера–океан, способствовавшие замедлению темпов роста температуры земного шара с 1998 по 2014 г. На основе данных дистанционного зондирования Земли и реанализа показана тесная связь глобального и регионального содержания водяного пара в атмосфере со скоростью приземного ветра и аномалиями температуры поверхностного слоя воды в тропической зоне Тихого океана. Усиление ветра в тропической зоне Тихого океана наблюдается с 1980 г. (коэффициент линейного тренда $-0.017 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}/\text{год}$). Наибольшее усиление ветра пришлось на период 1992–2013 гг. ($-0.025 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}/\text{год}$). В эти годы температура поверхностного слоя воды в центрально- и восточно-экваториальной зоне Тихого океана понижалась со скоростью $0.024 \text{ К}/\text{год}$, а глубинные воды на западе Тихого океана (к северу от экватора) накапливали тепло. Указанные тенденции способствовали уменьшению испарения с поверхности Тихого океана, которое с задержкой около года сказывается на глобальном содержании водяного пара в атмосфере (коэффициент корреляции 0.88). В результате среднее по планете содержание водяного пара в столбе атмосферы понижалось до 2014 г. со средней скоростью $0.12 \text{ мм}/\text{год}$. Расчеты модели переноса излучения в атмосфере показывают, что уменьшение интегрального содержания водяного пара в атмосфере с 2001 по 2014 г. снизило приходную часть радиационного баланса подстилающей поверхности примерно на $0.93 \text{ Вт}/\text{м}^2$, что примерно в 11 раз превышает усиление парникового эффекта CO_2 за эти годы. Такие тенденции изменений содержаний парниковых газов в атмосфере обуславливали понижение зимней температуры воздуха в Северном полушарии. Летняя температура воздуха продолжала расти за счет уменьшения оптической толщины облаков в широтном поясе $30^\circ\text{--}75^\circ \text{ с.ш.}$ и прогревания подстилающей поверхности солнечной радиацией.

Ключевые слова: климат, глобальное потепление, океан, скорость ветра, водяной пар, оптическая толщина облаков, радиационный баланс.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-5566201933-12>

ВВЕДЕНИЕ

Проблема климатических изменений находится в центре пристального внимания мирового сообщества, поскольку затрагивает многочисленные сферы экономики и международной безопасности. В последние годы интенсивно расширяется система глобального дистанционного мониторинга окружающей среды, совершенствуются климатические модели и повышаются технические возможности для кратковременных прогнозов погоды и климата. Однако уровень научного понимания процессов и явлений в климатической системе все еще нельзя признать достаточным, а вопрос причинности современных изменений климата до настоящего времени остается альфой и омегой современной климатологии.

На фоне восходящего тренда средней температуры поверхности Земли отчетливо выделяют-

ся паузы и периоды замедления скорости ее роста. Длительная пауза в глобальном потеплении наблюдалась в середине прошлого века (с 1945 г. до конца 60-х – начала 70-х годов), а с 1998 по 2013 г. скорость роста глобальной температуры Земли ($0.023 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$) была примерно в два раза меньше, чем за три предыдущих десятилетия ($0.051 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$) [9]. При этом средняя температура Северного полушария в январе–феврале с 1998 по 2013 г. даже понижалась (примерно на $0.025 \text{ }^\circ\text{C}$ в год), несмотря на увеличивающуюся эмиссию углекислого газа в атмосферу и ослабленную роль солнечной радиации в формировании радиационного баланса подстилающей поверхности в зимние месяцы.

В качестве возможных причин замедления темпов глобального потепления рассматриваются следующие естественные факторы:

уменьшение потока солнечного излучения, поступающего на верхнюю границу атмосферы [3, 4, 7, 14]; рост эмиссии аэрозолей в атмосферу от вулканов [18, 20] и биогенных источников [21, 23]; внутренние квазипериодические колебания в системе “атмосфера–океан” [1, 2, 6, 11, 22, 25]; усиление океанических течений [8, 12, 13]. Ретроспективное моделирование климата Земли за период его инструментальных наблюдений выявило решающую роль центральной и восточной части экваториальной зоны Тихого океана в короткопериодных флуктуациях и замедлении скорости роста глобальной температуры [15, 17, 19]. Однако вопрос о механизме влияния этой зоны Тихого океана на современный климат остается дискуссионным и требует более тщательного изучения.

Возможными океаническими “агентами” океана, посредством которых осуществляется энергетическая регуляция глобального климата, являются водяной пар и облачность. Известно, что фазы Южного колебания (Эль-Ниньо и Ла-Нинья) способны модулировать скорость испарения в атмосферу, вызывая тем самым короткопериодные флуктуации климата [15]. Данные о водяном паре, собранные в рамках глобального проекта NVAP (NASA Water Vapor Project) [24], и спутниковые наблюдения на базе спектрометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) [16] показывают уменьшение общего содержания водяного пара в атмосфере с начала 1990-х годов. Примечательно, что содержание водяного пара в атмосфере уменьшалось параллельно с охлаждением поверхностных вод экваториальной зоны Тихого океана, связанным, по расчетам климатических моделей, с усилением пассатов [13]. Очевидно, что понижение температуры поверхности океана могло замедлить поступление водяного пара в атмосферу и повлиять на процессы образования облаков.

В настоящей работе оценивается роль центральной и восточной частей экваториальной зоны Тихого океана в изменении общего содержания водяного пара в атмосфере (TCWV, Total Column Water Vapor) и оптической толщины облаков (COT, Cloud Optical Thickness) – их основного оптического параметра, влияющего на общее пропускание атмосферой электромагнитного излучения. Исходя из наблюдаемой динамики температуры поверхности океана (SST, Sea Surface Temperature), TCWV, COT и содержания углекислого газа в атмосфере дается объяснение особенностей изменения температуры Северного полушария в холодный и теплый периоды года с начала XXI в. Предполагаемый механизм замедления скорости роста глобальной температуры подтверждается расчетами радиационной модели атмосферы и данными наблюдений.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

В качестве основы для проведения исследований использовались следующие комплекты данных:

- температура поверхности океана (SST, Sea Surface Temperature), предоставляемая Центром Гадлея Метеорологической службы Великобритании (база данных HadISST);

- аномалия 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) и параметры облаков (эффективный радиус частиц, оптическая толщина, высота верхней границы и степень покрытия атмосферы) с 2000 г., восстановленные по данным зондирования атмосферы прибором MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer);

- среднеглобальные значения TCWV с 1987 по 1999 г. из базы данных NVAP (NASA Water Vapor Project), построенной на основе измерений высотных профилей метеопараметров атмосферы с метеорологических спутников и радиозондов;

- глобальные поля приповерхностной скорости ветра (TWS, Terrestrial Wind Speed), рассчитанные с использованием модели MERRA-2, иницируемой данными наземных и спутниковых наблюдений за состоянием атмосферы.

Для понимания причин многолетних изменений содержания водяного пара в атмосфере в первую очередь необходимо рассмотреть тенденции изменений температуры и приповерхностной скорости ветра в различных районах Мирового океана. Коэффициенты линейных трендов SST и TWS, рассчитанные для периода 1992–2013 гг., в который, по данным [13], происходило усиление тихоокеанских пассатов, приведены на рис. 1а, в. На их глобальных распределениях отчетливо видны районы Мирового океана, в которых циркуляционные процессы усиливались, а температура поверхности океана понижалась. Данные процессы развивались наиболее интенсивно в центральной и восточной частях экваториальной зоны Тихого океана, а также в тихоокеанском секторе Южного океана. Усиление скорости ветра в этих районах могло индуцировать океанические течения, посредством которых осуществлялся перенос тепла с поверхности океана на глубину [8, 12, 13]. Для Тихого океана этот вывод частично подтверждается спутниковыми данными по аномалиям SLH, обусловленным тепловым расширением воды.

Тренды тепловой составляющей SLH, приведенные в виде глобальной карты на рис. 1б, демонстрируют наличие области на западе Тихого океана, которая наиболее интенсивно нагревалась во время последней климатической паузы. На распределении тренда SST эта особенность не проявляется, что говорит о процессах накопления тепла глубинными слоями океана.

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. Глобальное распределение тренда TCWV для летнего сезона приведено на рис. 1г. Его схожесть с аналогичными распределениями для SST и TWS (см. рис. 1а, в) является следствием законов сохранения энергии (в данном случае — в виде скрытой теплоты парообразования) и количе-

ства движения в гидротермодинамических процессах. Коэффициент корреляции между отклонениями средних летних значений SST и TCWV от их трендов более чем на половине площади Мирового океана превышает 0.55. Наиболее значимая корреляция и скорость изменения TCWV (-0.28 мм/год) наблюдаются в восточной и центральной зонах Тихого океана, лежащих между 30° ю.ш. и 30° с.ш. Температура поверхности этой зоны океана в годы климатической паузы понижалась со скоростью -0.026 °C/год, а тропические ветра усиливались со скоростью 0.032 м · с⁻¹/год.

О межгодовой изменчивости TWS, SST и TCWV в зоне Тихого океана с понижающейся температурой поверхностных вод (область на рис. 1а между 30° ю.ш. и 30° с.ш.) можно судить по зависимостям, представленным на рис. 2. Видно, что изменения SST и TWS тесно коррелируют

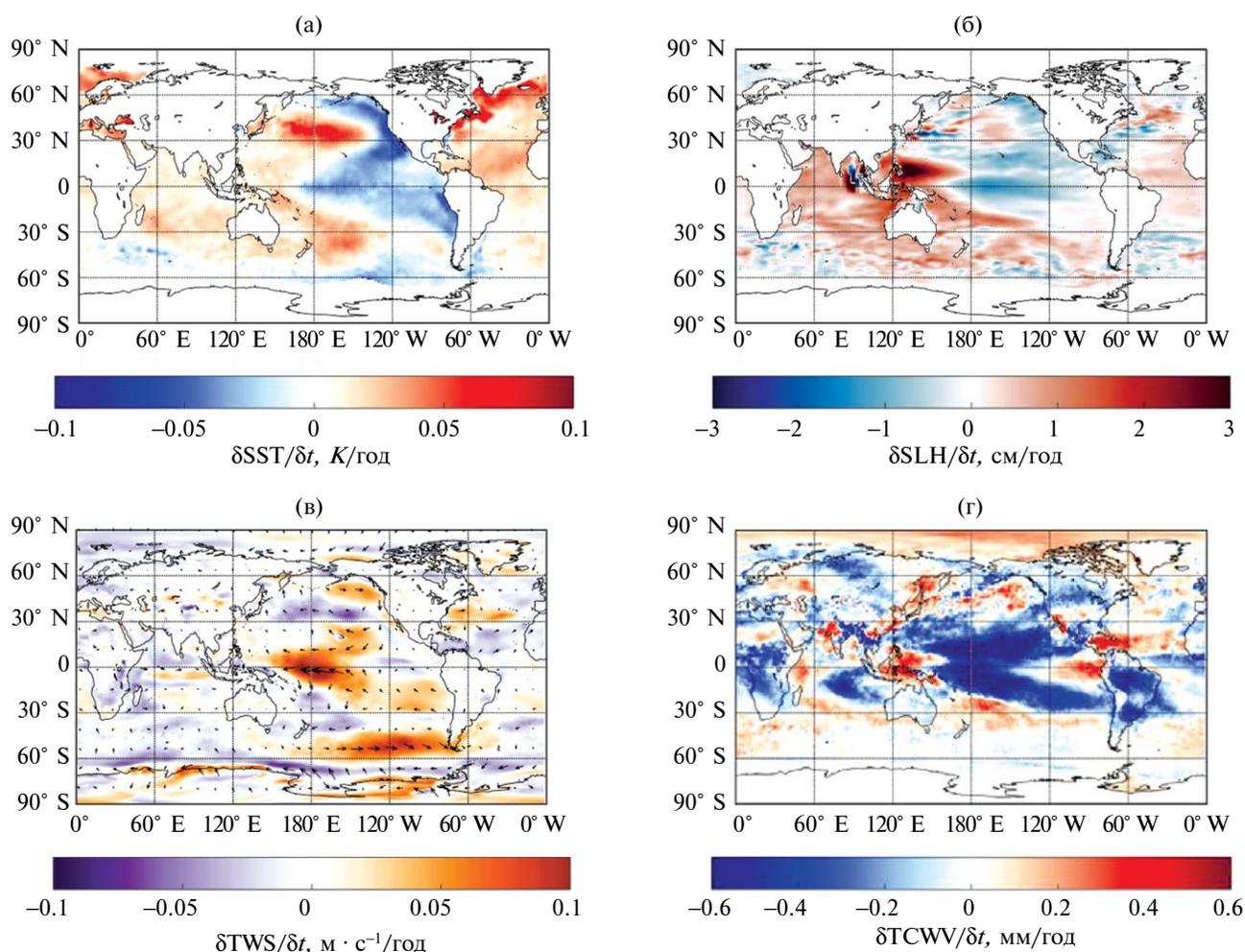


Рис. 1. Глобальные распределения трендов метеорологических параметров: температуры поверхности океана в 1992–2013 гг. (а), тепловой составляющей высоты уровня моря в 2001–2012 гг. (б), скорости ветра на высоте 2 м от подстилающей поверхности в 1992–2013 гг. (в) и общего содержания водяного пара в столбе атмосферы с июня по август в 2001–2013 гг. (г).

друг с другом ($R = 0.85$). Связь между SST и TWS достаточно точно описывается уравнением линейной регрессии:

$$SST = 31.45 - 1.06 \cdot TWS,$$

где SST выражена в $^{\circ}\text{C}$, а TWS — в м/с. Из данного уравнения следует, что при усилении скорости приповерхностного ветра на 1 м/с температура поверхности центральной и восточной частей экваториальной зоны Тихого океана понижается на 1.06°C . Максимальный тренд в их динамике приходится на 1992–2013 гг.: $0.025 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}/\text{год}$ — для TWS и $-0.024 \text{ К}/\text{год}$ — для SST. Однако усиление скорости ветра над рассматриваемой зоной Тихого океана началось, как минимум, с 1980 г. Для периода с 1980 по 2013 г. тренды TWS и SST составляют соответственно $0.017 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}/\text{год}$ и $-0.007 \text{ К}/\text{год}$. В последние годы (с 2015 по 2017) наблюдается отклонение от этой тенденции, однако примерно такие же флуктуации TWS, связанные с событиями Эль-Ниньо, уже происходили ранее, например в 1983, 1987 и 1997 гг.

Охлаждение поверхности океана, как видно из рис. 2б, сопровождается уменьшением содержания водяного пара над ней. Динамика средних

значений TCWV в летние месяцы над тропической зоной Тихого океана проявляется в среднеглобальных значениях TCWV следующего года с коэффициентом корреляции ~ 0.88 , что говорит о первостепенной роли Тихого океана в регулировании влагооборота атмосферы. Временной ряд среднеглобальных значений TCWV, построенный по данным NVAP (1987–1999 гг.) и MODIS (с 2000 г.), показывает практически равномерное понижение величины осаждаемого слоя водяного пара со скоростью $-0.12 \text{ мм}/\text{год}$. Существенные отклонения от этого тренда произошли лишь в 1997–1999 гг. после беспрецедентно мощного Эль-Ниньо.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Оценим, как изменения TCWV в годы замедленного роста глобальной температуры отразились на радиационном балансе подстилающей поверхности. Для этого использовалась разработанная нами модель переноса излучения в системе “атмосфера — подстилающая поверхность”. Модель включает в себя отдельные блоки по расчету высотных профилей физических

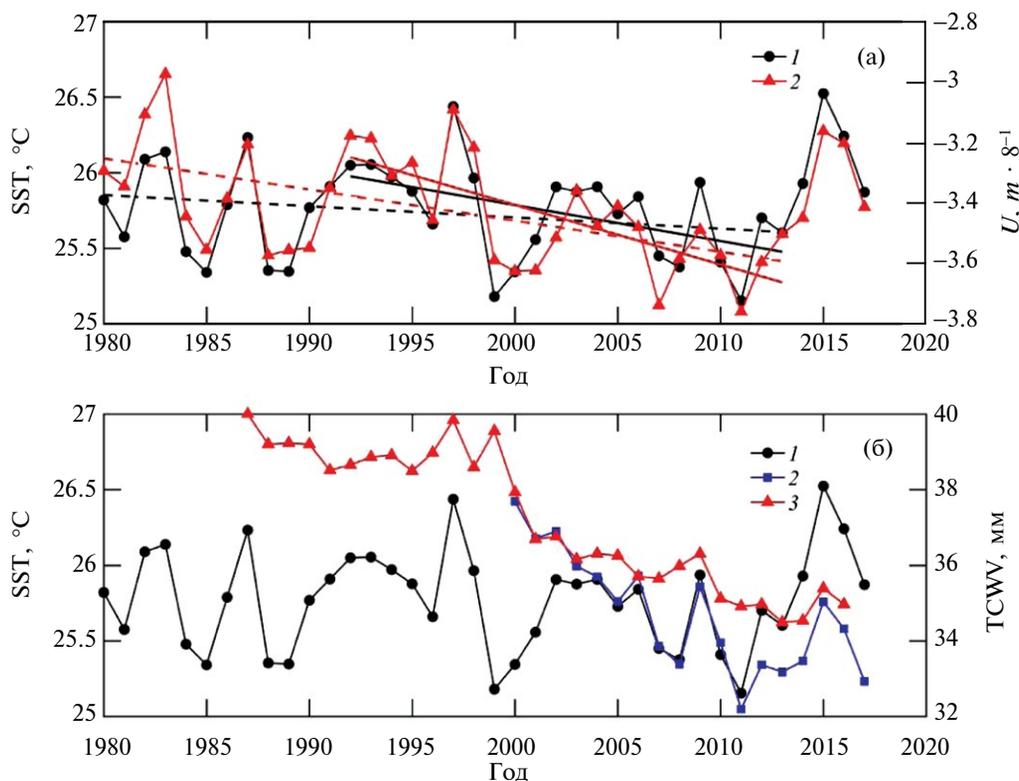


Рис. 2. Межгодовая изменчивость SST, зональной компоненты скорости приповерхностного ветра (U) и TCWV.

(а): 1 — SST, 2 — U , сплошные линии — тренды за 1992–2013 гг., пунктир — тренды за 1980–2013 гг.; (б): 1 — SST, 2 — TCWV в летние месяцы над тропической зоной Тихого океана с отрицательным трендом SST, 3 — среднеглобальные значения TCWV, умноженные на коэффициент 1.6 и сдвинутые на один год назад для их сопоставления с TCWV над тропиками.

параметров атмосферы (температуры, влажности воздуха, парциального давления газовых компонент), оптических характеристик аэрозоля и облаков (показателей ослабления, рассеяния, индикатрисы рассеяния), газового поглощения и рассеяния, восходящих и нисходящих потоков солнечного и теплового излучения.

Рассмотрим два значения TCWV: 23.5 мм (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 – 0.25, концентрация CO₂ – 370.41 ppmv (уровень 20017 г.) и 397.11 ppmv (2014 г.), концентрации других атмосферных газов и их высотная стратификация приняты в соответствии со стандартной моделью атмосферы для лета средних широт. Температура подстилающей поверхности во всех проводимых расчетах задавалась постоянной – 20 °С. Тип подстилающей поверхности соответствовал смешанному в равных пропорциях почвы, хвойной и лиственной растительности с альбедо и излучательной способностью, взятыми из базы данных ASTER [5]. Косинус зенитного угла Солнца задавался равным 0.58, что соответствует его оптимальному значению для расчетов планетарного альбедо [10].

Результаты расчетов приведены в табл. 1. Видно, что уменьшение общего содержания водяного пара в атмосфере с 2001 по 2014 г. снизило приходную часть радиационного баланса подстилающей поверхности примерно на 0.93 Вт/м². Эта величина примерно в 11 раз превышает приток к подстилающей поверхности длинноволнового излучения за счет увеличения концентрации CO₂ в атмосфере.

Очевидно, что при наблюдаемой динамике TCWV в начале 2000-х годов результирующий радиационный форсинг на подстилающую поверхность должен был уменьшаться. Однако

в действительности скорость изменения среднегодовой температуры Земли в эти годы уменьшилась примерно в два раза, но осталась положительной. При этом замедление темпов глобального потепления с 1998 по 2013 г. происходило в основном за счет зимних месяцев (январь–февраль) и средних широт Северного полушария Земли. В теплый же период года температура приземного воздуха даже в этих широтах продолжала расти практически с неизменной скоростью.

Отмеченные региональные и глобальные особенности изменения температуры подстилающей поверхности и приземного воздуха можно объяснить косвенными механизмами воздействия водяного пара на климат и, в частности, его влиянием на процессы формирования облаков. Данные спутникового прибора MODIS показывают, что среднее значение TCWV на северных широтах от 30° до 60° практически однозначно определяет среднюю оптическую толщину облаков (COT) в этом же широтном поясе с задержкой во времени в 5 месяцев (рис. 3). COT представляет собой произведение показателя ослабления частиц облака на его толщину и является основным радиационным параметром облаков. Установленная связь между сдвинутыми во времени значениями TCWV и COT проявляется с коэффициентом корреляции ~0.96, т.е. фактически является функциональной. Что касается степени покрытия атмосферы облаками – наиболее понятного и часто используемого на практике параметра облачности, то, по данным MODIS, его глобальные и региональные флуктуации находятся на уровне погрешностей измерений и, очевидно, не способны заметно влиять на радиационный баланс планеты: глобальные среднеквадратические отклонения ~0.005, в зоне умеренных и приполярных широт Северного полушария ~0.004, над Евразией ~0.04, над Северной Америкой ~0.006.

Таблица 1. Оценки радиационных воздействий на подстилающую поверхность в солнечной (shortwave, SW) и тепловой (longwave, LW) областях спектра за счет вариаций содержаний водяного пара ($\delta TCWV$) и углекислого газа (δC) в атмосфере

TCWV, мм	C_{GHG} , ppmv	$\delta TCWV$, мм	δC_{GHG} , ppmv	δF_{SW} , Вт/м ²	δF_{LW} , Вт/м ²	δF_{Tot} , Вт/м ²
23.5	370	–2	0	2.887	–3.827	–0.938
23.5	397	–2	0	2.851	–3.782	–0.929
21.5	370	0	27	–0.136	0.223	0.087
23.5	370	0	27	–0.100	0.178	0.078

Примечание. 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.

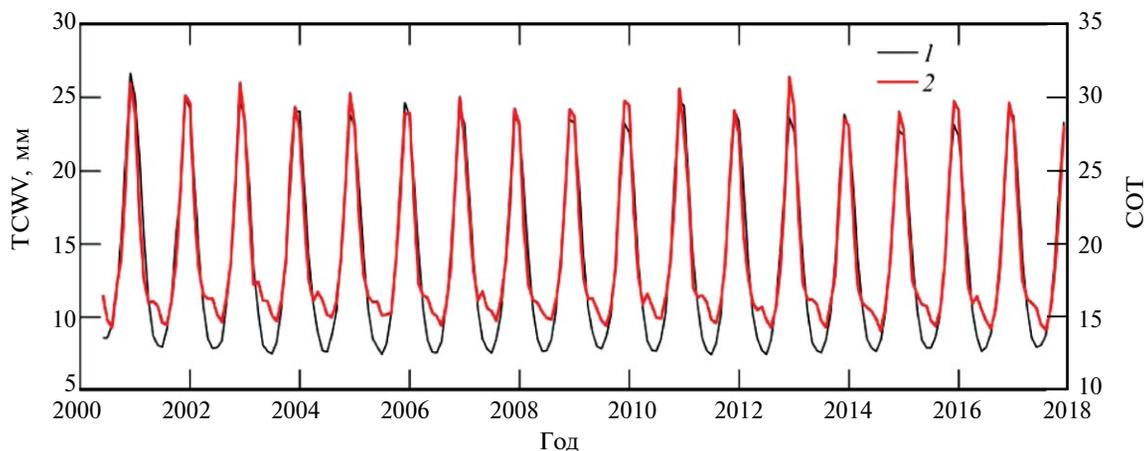


Рис. 3. Динамика общего содержания водяного пара в атмосфере (1), сдвинутой во времени на -5 месяцев, в сопоставлении с фактической динамикой оптической толщины облаков (2) в широтном поясе 30° – 60° с.ш.

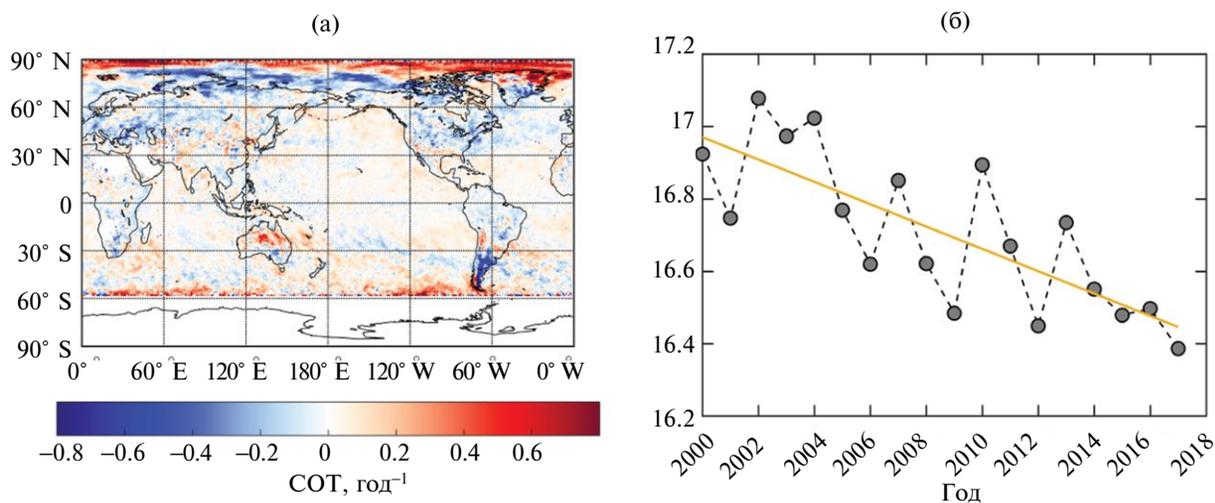


Рис. 4. Глобальное распределение тренда оптической толщины облаков в теплый период года для Северного полушария (май–сентябрь) (а) и ее динамика в широтном поясе между 30° и 75° с.ш. (б).

Глобальное распределение тренда средней оптической толщины облаков с мая по сентябрь (теплый период года для Северного полушария) представлено на рис. 4а. Отрицательные тренды COT наблюдаются в средних и субполярных районах Северного полушария. Среднее значение COT для пояса Земного шара, лежащего между 30° и 75° с.ш., убывает с каждым годом на величину ~ 0.031 , причем эта тенденция устойчиво сохраняется как минимум с 2000 г. Преобладание такой тенденции именно над континентами Северного полушария, по-видимому, связано с особенностями атмосферной циркуляции над ними в рассматриваемые годы. Анализ типов атмосферной циркуляции по Б.Л. Дзердзевскому показывает увеличение повторяемости и продолжительности арктических

вторжений в Тихоокеанском секторе Северного полушария (170° E – 120° W) с 1992 по 2013 г. Такие вторжения блокируют западный перенос воздушных масс влажного воздуха с Тихого океана на континенты Северного полушария. Блокирующие воздушные потоки с Севера слабо обогащены влагой и, поступая на теплую континентальную поверхность, еще более удаляются от состояния насыщения. Уменьшение относительной влажности воздуха, в свою очередь, сказывается на общей облачности и ее оптической толщине.

Для количественных оценок влияния наблюдаемых изменений COT на радиационный баланс подстилающей поверхности проведены численные расчеты переноса излучения в атмосфере. В качестве опорных значений параметров

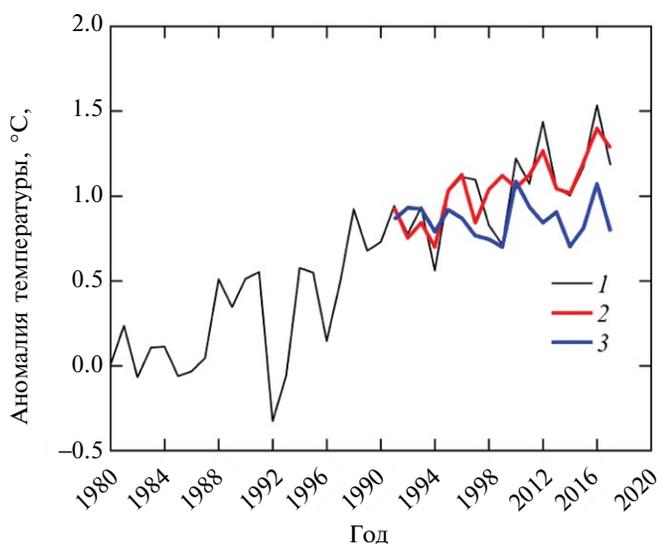


Рис. 5. Наблюдаемая (1) и смоделированная динамика аномалии приземной температуры воздуха в теплый период года для пояса Северного полушария, лежащего между 30° и 75° с.ш., без учета (2) и с учетом (3) изменений оптической толщины облаков.

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 рядов среднегодовых значений оптической толщины облаков, концентраций CO_2 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. 5 с данными наблюдений для широтной зоны 30°–75° с.ш. При расчетах радиационного баланса подстилающей поверхности рассмотрено два сценария межгодовой динамики оптической толщины облаков: ее постоянство с 2000 г. и изменение в соответствии с данными спутниковых наблюдений, представленными на рис. 46. В первом случае модельные расчеты дают практически постоянную температуру с 2000 по 2017 г. Это говорит о том, что в средних и субполярных широтах Северного полушария потепление климата, связанное с антропогенными выбросами CO_2 в атмосферу, практически полностью компенсируется 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 °С/год). Причем положительная величина этого тренда хорошо объясняется уменьшением оптической

толщины облаков и, как следствие, бóльшим пропусканием ими солнечного излучения.

В зимние месяцы в Северном полушарии поток солнечного излучения минимален, а подстилающая поверхность часто покрыта снегом и отражает значительную часть падающего на нее излучения. В этих условиях приток солнечного излучения к подстилающей поверхности, связанный с уменьшением оптической толщины облаков, не способен компенсировать ее выхолаживание за счет уменьшения парникового эффекта водяного пара. Этим объясняется понижение зимней температуры воздуха в умеренных широтах, наблюдавшееся на фоне нисходящего тренда TCWV с 1998 по 2013 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ глобальной динамики атмосферы и океана, проведенный на основании данных спутниковых измерений и реанализа метеорологических данных, показывает тесную корреляцию между среднегодовыми значениями температуры поверхности океана, приземной скоростью ветра и содержанием водяного пара в атмосфере. Среднеглобальное содержание водяного пара в атмосфере убывает с конца 1980-х годов со средней скоростью около -0.12 мм/год. Основной вклад в наблюдаемые изменения TCWV вносит Тихий океан. Температура воды в восточной и центральной частях тропической зоны Тихого океана в среднем понижается с 1980 г. со скоростью -0.007 К/год на фоне усиления приповерхностной скорости ветра (на 0.017 м/с за год). При этом происходит накопление тепла

глубинными водами у западных берегов Тихого океана на севере от экватора.

Расчеты по радиационной модели атмосферы показывают, что уменьшение общего содержания водяного пара в атмосфере с 2001 по 2014 г. снизило приходную часть радиационного баланса подстилающей поверхности примерно на 0.93 Вт/м^2 . Эта величина более чем в 11 раз превышает приток к поверхности длинноволнового излучения за счет увеличения концентрации CO_2 в атмосфере за те же годы. Охлаждению подстилающей поверхности препятствовало уменьшение оптической толщины облаков в средних и субполярных районах Северного полушария. В этих широтах оптическая толщина облаков практически однозначно связана со значениями TCWV пятью месяцами ранее. В теплый период года потепление за счет эмиссии CO_2 в атмосферу полностью компенсировалось уменьшением парникового эффекта водяного пара, а наблюдаемый рост летних температур был связан с большим пропусканием облаками солнечного излучения. В зимние месяцы приповерхностная температура воздуха понижалась, поскольку радиационное выхолаживание подстилающей поверхности в результате уменьшения парникового эффекта водяного пара не компенсировалось притоком к ней солнечного излучения в результате уменьшения оптической толщины облаков.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Государственной программы “Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов на 2016–2020 годы”.

FUNDING

The work was carried out within the framework of the State Program “Environmental Protection and Sustainable Use of Natural Resources for 2016–2020”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бышев В.Н., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. О пространственной неоднородности некоторых параметров глобальной изменчивости современного климата // Докл. акад. наук. 2009. Т. 426. № 4. С. 543–548.
2. Бышев В.Н., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. Эль-Ниньо как следствие глобальной атмосферной осцилляции в динамике климатической системы Земли // Докл. акад. наук. 2012. Т. 446. № 1. С. 89–94.
3. Федоров В.М. Тенденции изменения температуры поверхности Мирового океана и их причины // Сложные системы. 2015. Т. 2. № 5. С. 45–56.
4. Федоров В.М. Инсоляция Земли и современные изменения климата. М.: Физматлит., 2018. 232 с.
5. Baldridge A.M., Hook S.J., Grove C.I., Rivera G. The ASTER Spectral Library Version 2.0 // Remote Sens. Env. 2009. V. 113. P. 711–715.
6. Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content // Pure Appl. Geophys. 2017. V. 174. № 7. P. 2863–2878.
7. Camp C.D., Tung K.-K. Surface warming by the solar cycle as revealed by the composite mean difference projection // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. № L14703.
8. Chen X., Tung K.-K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration // Science. 2014. V. 345 (6199). P. 897–903.
9. Climatic Research Unit Data. URL. <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>.
10. Cronin T.W. On the Choice of Average Solar Zenith Angle // J. Atmospheric Sci. 2014. V. 71. № 8. P. 2994–3003.
11. Dai A., Fyfe J.C., Xie S.-P., Dai X. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability // Nat. Clim. Chang. 2015. V. 5. № 6. P. 555–559.
12. Drijfhout S.S., Blaker A.T., Josey S.A., Nurser A.J.G., Sinha B., Balmaseda M.A. Surface warming hiatus caused by increased heat uptake across multiple ocean basins // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. P. 7868–7874.
13. England M.H., McGregor S., Spence P., Meehl G.A., Timmermann A., Cai W., Gupta A.S., McPhaden M.J., Purich A., Santoso A. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus // Nat. Clim. Chang. 2014. V. 4. P. 222–227.
14. Hansen J., Sato M., Kharecha P., von Schuckmann K. Earth's energy imbalance and implications // Atmos. Chem. Phys. 2011. № 11. P. 13421–13449.
15. Hu S., Fedorov A.V. The extreme El Niño of 2015–2016 and the end of global warming hiatus // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. № 8. P. 3816–3824.
16. Kebiao M., Jingming C., Zhaoliang L., Ying M., Yang S., Xuelan T., Kaixian Y. Global Water Vapor Content Decreases from 2003 to 2012: An Analysis Based on MODIS Data // Chin. Geogr. Sci. 2017. V. 27. № 1. P. 1–7.
17. Kosaka Y., Xie S.-P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling // Nature. 2013. V. 501 (7467). P. 403–407.
18. Ridley D.A., Solomon S., Barnes J.E., Burlakov V.D., Deshler T., Dolgii S.I., Herber A.B., Nagai T., Neely III R.R., Nevzorov A.V., Ritter C., Sakai T., Santer B.D., Sato M., Schmidt A., Uchino O., Vernier J.P. Total volcanic stratospheric aerosol optical depths and implications for global climate change // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. P. 7763–7769.
19. Risbey J.S., Lewandowsky S., Langlais C., Monselesan D.P., O’Kane T.J., Oreskes N. Well-estimated global surface warming in climate projections selected for ENSO // Nat. Clim. Chang. 2014. V. 4. № 9. P. 835–840.

20. Santer B.D., Bonfils C., Painter J.F., Zelinka M.D., Mears C., Solomon S., Schmidt G.A., Fyfe J.C., Cole J.N.S., Nazarenko L., Taylor K.E., Wentz F.J. Volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature // *Nat. Geosci.* 2014. V. 7. P. 185–189.
21. Scott C.E., Arnold S.R., Monks S.A., Asmi A., Paasonen P., Spracklen D.V. Substantial large-scale feedbacks between natural aerosols and climate // *Nat. Geosci.* 2018. V. 11. P. 44–48.
22. Steinman B.A., Mann M.E., Miller S.K. Atlantic and Pacific multidecadal oscillations and Northern Hemisphere temperatures // *Science*. 2015. V. 347 (6225). P. 988–991.
23. Tunved P., Stroöm J., Kulmala M., Kerminen V.-M., Dal Maso M., Svenningsson B., Lunder C., Hansson H.-C. The natural aerosol over Northern Europe and its relation to anthropogenic emissions—implications of important climate feedbacks // *Tellus B*. 2008. V. 60. № 4. P. 473–484.
24. VonderHaar T.H., Forsythe J.M., Luo J., Randel D.L., Woo S. Water vapor trends and variability from the global NVAP dataset // 16th Symposium on Global Change and Climate Variations. URL: <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/84927.pdf>.
25. Yao S.-L., Huang G., Wu R.-G., Qu X. The global warming hiatus – a natural product of interactions of a secular warming trend and a multi-decadal oscillation // *Theor. Appl. Clim.* 2016. V. 123. № 1–2. P. 349–360.
10. Cronin T.W. On the choice of average solar zenith angle. *J. Atmos. Sci.*, 2014, vol. 71, no. 8, pp. 2994–3003.
11. Dai A., Fyfe J.C., Xie S.-P., Dai X. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability. *Nat. Clim. Chang.*, 2015, vol. 5, no. 6, pp. 555–559.
12. Drijfhout S.S., Blaker A.T., Josey S.A., Nurser A.J.G., Sinha B., Balmaseda M. A. Surface warming hiatus caused by increased heat uptake across multiple ocean basins. *Geophys. Res. Lett.*, 2014, vol. 41, no. 22, pp. 7868–7874.
13. England M.H., McGregor S., Spence P., Meehl G.A., Timmermann A., Cai W., Gupta A.S., McPhaden M.J., Purich A., Santoso A. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nat. Clim. Chang.*, 2014, vol. 4, pp. 222–227.
14. Hansen J., Sato M., Kharecha P., von Schuckmann K. Earth's energy imbalance and implications. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, vol. 11, no. 24, pp. 13421–13449.
15. Hu S., Fedorov A.V. The extreme El Niño of 2015–2016 and the end of global warming hiatus. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, vol. 44, no. 8, pp. 3816–3824.
16. Kebiao M., Jingming C., Zhaoliang L., Ying M., Yang S., Xuelan T., Kaixian Y. Global water vapor content decreases from 2003 to 2012: An analysis based on MODIS data. *Chin. Geogr. Sci.*, 2017, vol. 27, no. 1, pp. 1–7.
17. Kosaka Y., Xie S.-P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 2013, vol. 501, no. 7467, pp. 403–407.
18. Ridley D.A., Solomon S., Barnes J.E., Burlakov V.D., Deshler T., Dolgii S.I., Herber A.B., Nagai T., Neely III R.R., Nevzorov A.V., Ritter C., Sakai T., Santer B.D., Sato M., Schmidt A., Uchino O., Vernier J.P. Total volcanic stratospheric aerosol optical depths and implications for global climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 2014, vol. 41, no. 22, pp. 7763–7769.
19. Risbey J.S., Lewandowsky S., Langlais C., Monselesan D.P., O’Kane T.J., Oreskes N. Well-estimated global surface warming in climate projections selected for ENSO. *Nat. Clim. Chang.*, 2014, vol. 4, no. 9, pp. 835–840.
20. Santer B.D., Bonfils C., Painter J.F., Zelinka M.D., Mears C., Solomon S., Schmidt G.A., Fyfe J.C., Cole J.N.S., Nazarenko L., Taylor K.E., Wentz F.J. Volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature. *Nat. Geosci.*, 2014, vol. 7, pp. 185–189.
21. Scott C.E., Arnold S.R., Monks S.A., Asmi A., Paasonen P., Spracklen D.V. Substantial large-scale feedbacks between natural aerosols and climate. *Nat. Geosci.*, 2018, vol. 11, pp. 44–48.
22. Steinman B.A., Mann M.E., Miller S.K. Atlantic and Pacific multidecadal oscillations and Northern Hemisphere temperatures. *Science*, 2015, vol. 347, no. 6225, pp. 988–991.
23. Tunved P., Stroöm J., Kulmala M., Kerminen V.-M., Dal Maso M., Svenningsson B., Lunder C., Hansson H.-C. The natural aerosol over Northern Europe and its relation to anthropogenic emissions—implications of important climate feedbacks. *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.*, 2008, vol. 60, no. 4, pp. 473–484.

REFERENCES

1. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V. On the spatial heterogeneity of some parameters of the current climate global variability. *Dokl. Akad. Nauk*, 2009, vol. 426, no. 4, pp. 543–548. (In Russ.).
2. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V. El Niño as a consequence of global atmospheric oscillation in the dynamics of the Earth’s climate system. *Dokl. Akad. Nauk*, 2012, vol. 446, no. 4, pp. 89–94. (In Russ.).
3. Fedorov V.M. Trends in the temperature of the surface of the oceans and their causes. *Slozhnye Sistemy*, 2015, vol. 2, no. 5, pp. 45–56. (In Russ.).
4. Fedorov V.M. *Insolyatsiya Zemli i sovremennyye izmeneniya klimata* [Earth Insolation and Current Climate Change]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2018. 232 p.
5. Baldridge A.M., Hook S.J., Grove C.I., Rivera G. The ASTER Spectral Library Version 2.0. *Remote Sens. Environ.*, 2009, vol. 113, pp. 711–715.
6. Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content. *Pure Appl. Geophys.*, 2017, vol. 174, no. 7, pp. 2863–2878.
7. Camp C.D., Tung K.-K. Surface warming by the solar cycle as revealed by the composite mean difference projection. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, no. L14703.
8. Chen X., Tung K.-K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. *Science*, 2014, vol. 345, no. 6199, pp. 897–903.
9. Climatic Research Unit Data. Available at: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/> (accessed 12.03.2019).

24. VonderHaar T.H., Forsythe J.M., Luo J., Randel D.L., Woo S. Water vapor trends and variability from the global NVAP dataset, paper presented at *16th Symposium on Global Change and Climate Variations*. New Orleans, 2008. Available at: <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/84927.pdf> (accessed 12.03.2019).
25. Yao S.-L., Huang G., Wu R.-G., Qu X. The global warming hiatus – a natural product of interactions of a secular warming trend and a multi-decadal oscillation. *Theor. Appl. Climatol.*, 2016, vol. 123, no. 1–2, pp. 349–360.

Assessment of the Role of the Pacific Ocean in Present Climate Changes

V. F. Loginov and S. A. Lysenko*

Institute for Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

*e-mail: lysenkorfe@gmail.com

Received November 22, 2018; revised January 23, 2019; accepted January 24, 2019

Hydrothermodynamic processes in the atmosphere–ocean system played in favour of global warming slowdown in 1998–2014 were studied in this work. On the base of remote sensing and reanalysis data, close relationships between total global and regional column water vapour, terrestrial wind speed and temperature anomalies of upper layer water in tropical Pacific region were revealed. Increase of the wind speed in tropical Pacific has been observed since 1980 (linear trend ratio is $-0.017 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/\text{year}$). The most significant wind speed increase was in 1992–2013 ($-0.025 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/\text{year}$). During this period, the following phenomena were also observed: water temperature rise in upper layers of central and east equatorial Pacific regions by $0.024 \text{ K}/\text{year}$ and accumulation of heat in the deeper layers of western Pacific north of the equator. These tendencies contributed to decrease in evaporation from the surface of the Pacific, which exerts considerable influence on the global mean water vapour content in the atmosphere with nearly 1-year lag (correlation coefficient is 0.88). Thus, average total column water vapour had been decreasing with average rate $0.12 \text{ mm}/\text{year}$ until 2014. Atmospheric radiation transfer model calculations showed that decrease of water vapour content in atmospheric during 2001–2014 reduced the incoming part of Earth's surface radiation balance by $0.93 \text{ W}/\text{m}^2$, which exceeds CO_2 -related increase in greenhouse warming by 11 times. Such behaviour of greenhouse gases concentrations could be the reason of decrease of winter temperature in Northern hemisphere. Summer temperatures continued to grow due to decrease in cloud optical depth in 35°N – 70°N latitude zone and following radiation heating of the land surface.

Keywords: climate, global warming, ocean, wind speed, water vapour, cloud optical thickness, radiation balance.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-5566201933-12>