

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 551.583

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-750-755>

Поступило в редакцию 01.11.2018

Received 01.11.2018

С. А. Лысенко, академик В. Ф. Логинов, С. Л. Ощепков*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***МЕХАНИЗМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА**

Аннотация. Исследуются причины и механизм возникновения паузы в изменении климата с 1998 по 2014 г. На основании данных спутниковых измерений и метеорологического реанализа установлена связь между температурой тропической зоны Тихого океана, скоростью приповерхностного ветра и общим содержанием водяного пара в атмосфере. Дано объяснение интенсивного убывания содержания водяного пара в атмосфере в годы климатической паузы и количественно оценено связанное с этим изменение радиационного баланса подстилающей поверхности. Показано, что наблюдаемая динамика водяного пара привела к снижению приходной части радиационного баланса подстилающей поверхности на величину, более чем на порядок превышающую приток к ней длинноволнового излучения за счет увеличения концентрации углекислого газа. Стабилизации глобальной температуры способствовало уменьшение оптической толщины облаков, приводящее к дополнительному радиационному прогреву подстилающей поверхности в коротковолновом диапазоне.

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

Для цитирования: Лысенко, С. А. Механизмы стабилизации современного климата / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, С. Л. Ощепков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 750–755. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-750-755>

Sergei A. Lysenko, Academician Vladimir F. Loginov, Sergei L. Oshepkov*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***MECHANISMS OF STABILIZATION OF MODERN CLIMATE**

Abstract. This article investigates the causes and mechanism of change in the climatic pause from 1998 to 2014. In particular, based on the satellite data and the meteorological reanalysis we found a relationship between the temperature of the tropical region of the Pacific Ocean, the speed of the surface wind, and the total content of water vapor in the atmosphere. We also showed that the climatic pause can be explained by a decrease in the water vapor content in the atmosphere and evaluated how this decrease affected the radiation balance of the ground surface. The observed dynamics of water vapor is shown to lead to a decrease in the incoming part of the radiation balance of the ground surface by an amount, which is more than one order of magnitude larger than that caused by the increase in anthropogenic carbon dioxide. It was demonstrated that a decrease in the cloud cover optical thickness could also lead to the stabilization of the global temperature by means of radiative heating of the underlying surface.

Keywords: climate, ocean, water vapor, clouds, atmospheric radiation

For citation: Lysenko S. A., Loginov V. F., Oshepkov S. L. Mechanisms of stabilization of modern climate. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 750–755 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-750-755>

Введение. Современные глобальные и региональные изменения температуры, наблюдавшиеся за период инструментальных наблюдений, имеют более сложный характер, чем антропогенные изменения содержания парниковых газов в атмосфере. Во временной динамике среднегодовой температуры поверхности Земли отчетливо выделяются паузы, длящиеся более десяти лет. В последний раз рост глобальной температуры Земли приостанавливался с 1998 по 2014 г. До этого пауза в глобальном потеплении наблюдалась с 1945 г. до конца 1960-х – начала 1970-х годов. Такие события каждый раз вызывают интенсивные дискуссии в научном сообществе и заставляют климатологов более пристально взглянуть на причины естественной изменчивости климата.

В настоящей работе предпринята попытка объяснить паузы в изменении глобальной температуры с точки зрения механизмов формирования и трансформации водяного пара в атмосфере. В качестве основы для проведения исследований использовались данные искусственных спутников Земли и ретроспективные расчеты моделей общей циркуляции атмосферы, построенные на данных метеорологических наблюдений за прошедшее время (реанализ). Предполагаемый механизм стабилизации среднглобальной температуры подтверждается расчетами радиационной модели атмосферы при фактических данных о временной динамике водяного пара, углекислого газа и облачности.

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 спектро- радиометром ATSR (Along Track Scanning Radiometer);

аномалии высоты уровня моря (SLH, Sea Level Height) и ее составляющие (температурно-об- условленная 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), вос- становливаемое по данным пассивного зондирования атмосферы спутниковым прибором MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer);

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

Временной ряд глобальных среднемесячных значений TCWV, построенный по данным спут- никового прибора MODIS, приведен на рис. 1. Видно, что с 2000 по 2014 г. величина TCWV по- низжалась 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).

Влияние температуры поверхности океана на поступление влаги в атмосферу наиболее от- четливо 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 океа- на говорит о взаимообусловленности процес- сов перераспределения энергии (в виде скры- той теплоты парообразования) и количества движения между атмосферой и океаном. Вари- ации средних летних значений SST и TCWV относительно их трендов более чем на половине площади Мирового океана связаны с коэффи- циентом корреляции $>0,55$ (рис. 2, *d*). Наибо- лее значимая корреляция и скорость изменения TCWV ($-0,28$ мм/год) наблюдаются в восточ- ной и центральной зонах Тихого океана, ле- жащих между -30 и 30° с. ш. Температура по- верхности этой зоны океана в годы клима- тической паузы понижалась со скоростью $-0,026$ $^\circ\text{C}/\text{год}$, а тропические ветры усилива- лись со скоростью $0,032$ $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}/\text{год}$. В целом по планете скорость приповерхностного ветра с 1998 по 2013 г. уменьшилась на $0,093$ $\text{м}/\text{с}$, од- нако в тропической зоне Тихого океана и так- же в циркумполярной зоне Южного океана на-

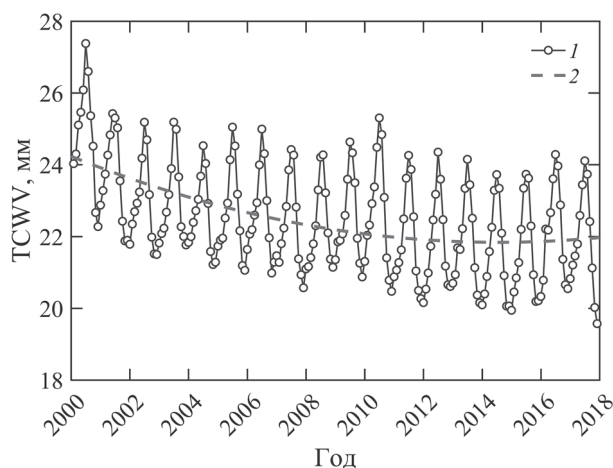


Рис. 1. Динамика (1) и квадратичный тренд (2) среднемесячных глобальных значений общего содержания водяного пара в столбе атмосферы

Fig. 1. Dynamics (1) and quadratic trend (2) one mean-month global values of the total water vapor content in the atmospheric column

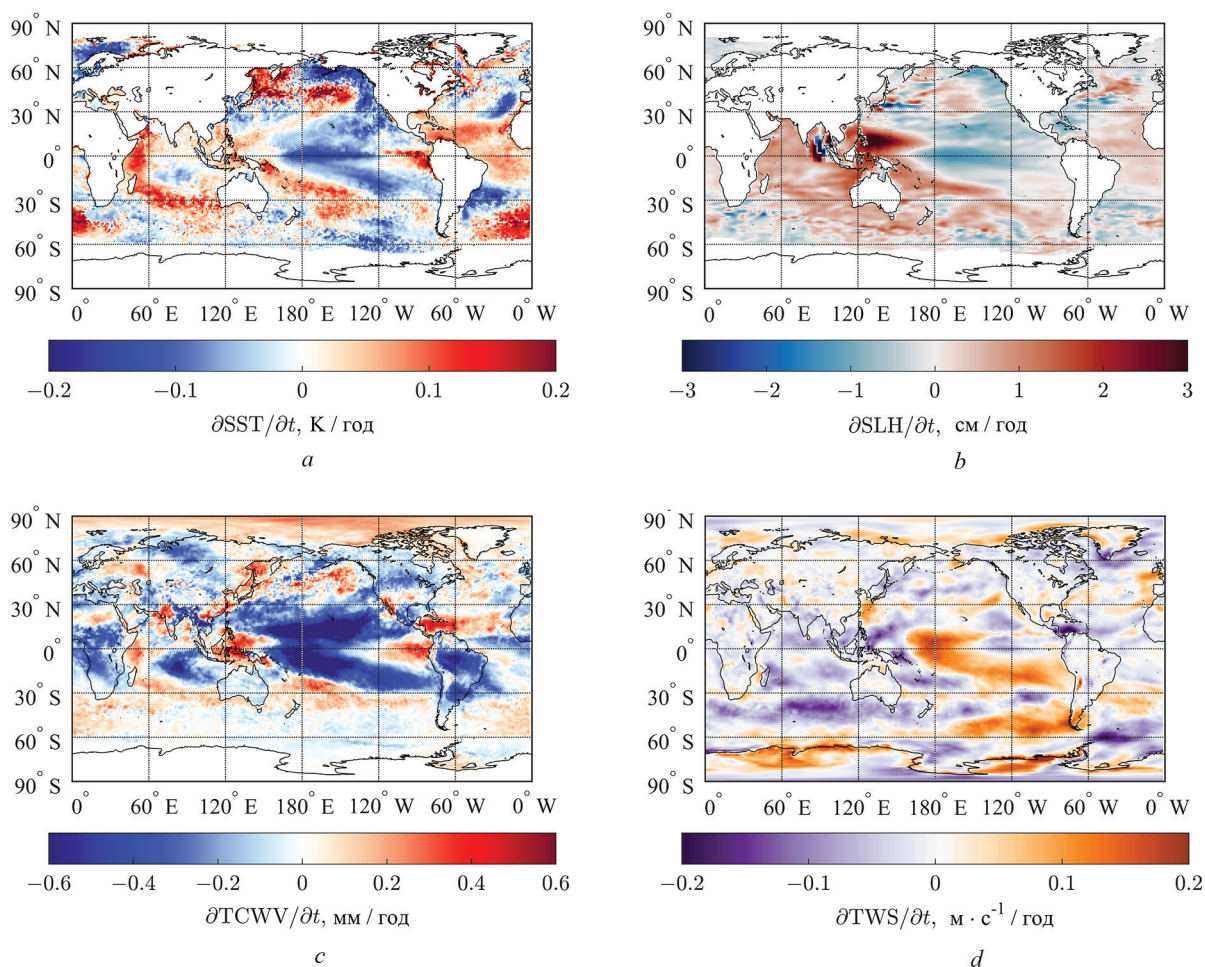


Рис. 2. Глобальные распределения трендов SST (a), SLH (b), TCWV (c) и TWS (d) в летние месяцы периода климатической паузы

Fig. 2. Global distributions of trends SST (a), SLH (b), TCWV (c) and TWS (d) during summer months of the climatic pause period

блюдался ее статистически значимый рост. Это обстоятельство могло способствовать усилению океанических течений и зональному переносу им тепла [1–3].

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 на данных спутниковых наблюдений и метеорологического реанализа для периода стабилизации глобальной температуры в начале текущего столетия:

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

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 ($-0,012$ °C/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 нами 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 (показателей ослабления, рассеяния, индикатрисы рассеяния), 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 при, концентрация CO₂ – 370,41 ppmv (уровень 2001 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 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 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 более чем в 11 раз превышает приток к подстилающей поверхности длинноволнового излучения за счет увеличения концентрации CO₂ в атмосфере.

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

Assessments of the radiation effects on the underlying surface in solar (shortwave, SW) and thermal (longwave, LW) spectral regions due to variations of the content of water vapor (δ TCWV) and carbon dioxide (δ CO₂) in the atmosphere

TCWV, mm	C _{GHG} , ppmv	δ _{TCWV} , mm	δ C _{GHG} , ppmv	δF_{sw} , W/m ²	δF_{LW} , W/m ²	δF_{Tot} , W/m 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

Примечания: 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.

Note: C_{GHG} – carbon dioxide concentration (greenhouse gas); F_{sw}, F_{LW} and F_{Tot} – descending flows of shortwave, longwave and total radiation at the lower boundary of the atmosphere respectively; δ – absolute value variations.

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. Этот 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 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 широтах Северного полушария (рис. 3), что, по-видимому, связано с особенностями атмосферной циркуляции в рассматриваемые годы. Проведенный нами анализ типов атмосферной циркуляции по Дзердзеевскому 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

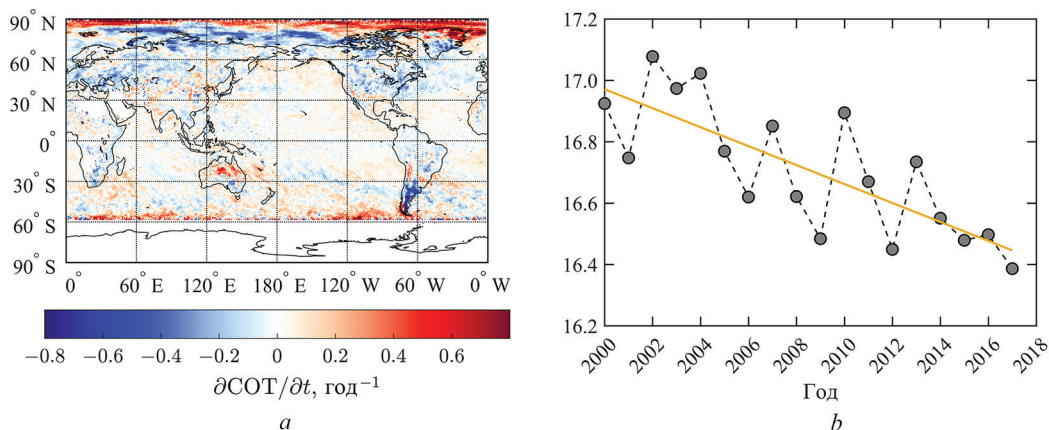


Рис. 3. Глобальное распределение тренда оптической толщины облачности в теплый период года Северного полушария (май–сентябрь) (а) и ее динамика в земном поясе между 30 и 75° с. ш. (b)

Fig. 3. Global distribution of the trend of the optical thickness of cloudiness during the warm season of the Northern hemisphere (May–September) (a) and its dynamics in the earth belt between 30 and 75° north latitude (b)

относительной влажности воздуха, очевидно, сказывается на общей облачности и ее оптической толщине.

Для количественных оценок влияния наблюдаемых изменений оптической толщины аэрозоля 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 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. 4 с данными наблюдений для широтной зоны 30–75° с. ш.

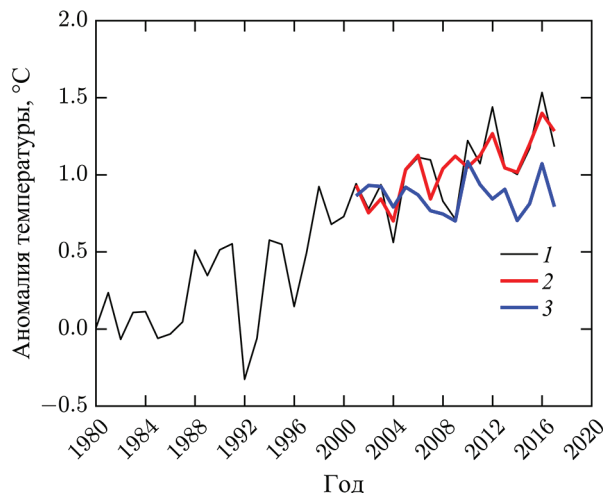


Рис. 4. Наблюдаемая (1) и смоделированная динамика аномалии приземной температуры воздуха в теплый период года для пояса Северного полушария, лежащего между 30 и 75° с. ш., без учета (2) и с учетом (3) изменений оптической толщины облаков

Fig. 4. Observed (1) and modeled dynamics of anomaly of the air ground temperature during the warm season for the belt of the North hemisphere between 30 and 75° north latitude, with no regard (2) and with regard (3) of changes in the optical thickness of clouds

При расчетах радиационного баланса подстилающей поверхности рассмотрено два сценария межгодовой динамики оптической толщины облачности: ее постоянство с 2000 г. и изменение в соответствии с данными спутниковых наблюдений, представленными на рис. 3, b. 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 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 ($\sim 0,029$ °C/год). При этом положительная ве-

личина 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 ослаблен, а подстилающая поверхность часто покрыта снегом и отражает значительную часть падающего на нее излучения. 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.

Заключение. Таким образом, на основании данных дистанционного зондирования Земли, компьютерного моделирования можно сделать вывод, что стабилизация температуры Земного шара в начале текущего столетия была результатом противоположно направленных радиационных воздействий на подстилающую поверхность, обусловленных 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. Под влиянием этих процессов среднегодовая температура воздуха поддерживалась практически неизменной.

Список использованных источников

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, N 3. – P. 222–227. <https://doi.org/10.1038/nclimate2106>
2. Surface warming hiatus caused by increased heat uptake across multiple ocean basins / S. S. Drijfhout [et al.] // *Geophys. Res. Lett.* – 2014. – Vol. 41, N 22. – P. 7868–7874. <https://doi.org/10.1002/2014gl061456>
3. Chen, X. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration / X. Chen, K.-K. Tung // *Science.* – 2014. – Vol. 345, N 6199. – P. 897–903. <https://doi.org/10.1126/science.1254937>
4. The ASTER Spectral Library Version 2.0 / A. M. Baldridge [et al.] // *Remote Sens. Environ.* – 2009. – Vol. 113, N 4. – P. 711–715. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.007>
5. Cronin, T. W. On the Choice of Average Solar Zenith Angle / T. W. Cronin // *J. Atmospheric Sci.* – 2014. – Vol. 71, N 8. – P. 2994–3003. <https://doi.org/10.1175/jas-d-13-0392.1>

References

1. 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. *Nature Climate Change*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 222–227. <https://doi.org/10.1038/nclimate2106>
2. 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. *Geophysical Research Letters*, 2014, vol. 41, no. 22, pp. 7868–7874. <https://doi.org/10.1002/2014gl061456>
3. 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. <https://doi.org/10.1126/science.1254937>
4. Baldridge A. M., Hook S. J., Grove C. I., Rivera G. The ASTER Spectral Library Version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, no. 4, pp. 711–715. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.007>
5. Cronin T. W. On the Choice of Average Solar Zenith Angle. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, vol. 71, no. 8, pp. 2994–3003. <https://doi.org/10.1175/jas-d-13-0392.1>

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – д-р физ.-мат. наук, заместитель директора. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lysenkorfe@gmail.com.

Логинов Владимир Федорович – академик, д-р географ. наук, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

Ощепков Сергей Леонидович – д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sergey.http@gmail.com.

Information about the authors

Lysenko Sergey Alexandrovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Deputy Director. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lysenkorfe@gmail.com.

Loginov Vladimir Fedorovich – Academician, D. Sc. (Geography), Chief researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

Oshepkov Sergey Leonidovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Chief researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergey.http@gmail.com.