

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ОБЩЕГО ПОКАЗАТЕЛЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЭКОКЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Г.А. Александров

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
РФ, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3; *g.alexandrov@ifaran.ru*

Резюме. Выбор показателей для адекватной диагностики климатических изменений, имеющих экологическое значение, представляет собой актуальную проблему в связи с предполагаемыми изменениями глобального климата. В качестве общего показателя изменений теплового режима в статье предлагается использовать показатель термической аналогичности сравниваемых климатических условий, который диагностирует неспецифические изменения сезонного хода среднемесячных температур. Информативность этого показателя иллюстрируется на примере изменений климата Москвы. Показано, что климат Москвы в период 1986-2015 гг. вряд ли можно считать термически аналогичным климату Москвы периода 1961-1990 гг. – термическим аналогом климата Москвы в период 1986-2015 гг. является климат Брянской области периода 1961-1990 гг. Что же касается теплового режима Москвы в 2071-2100 гг., то есть основания предполагать, что он будет аналогичен тепловому режиму Белгородской области периода 1961-1990 гг. Таким образом, есть основания предполагать, что изменения теплового режима, которые предстоит претерпеть природным экосистемам московского региона в этом веке, будут сопоставимы с теми изменениями, которые они претерпели в прошлом веке. Выводы, полученные для Москвы, нельзя автоматически переносить на другие регионы. В некоторых регионах может сформироваться тепловой режим, не имеющий близких исторических аналогов. Выявление таких регионов представляет собой актуальное направление экоклиматического мониторинга.

Ключевые слова. Информативные показатели, изменение климата, климат Москвы.

TOWARDS THE CHOICE OF A GENERIC INDICATOR FOR MONITORING ECOCLIMATIC CHANGES

G.A. Alexandrov

Institute of atmospheric physics. A. M. Obukhov of RAS,
3, Pyzhevskii lane, 119017, Moscow, Russia; *g.alexandrov@ifaran.ru*

Summary. The choice of indicators for adequate diagnostics of the ecologically significant climatic changes is a problem of current interest due to anticipated changes of the global climate. In this paper, a generic indicator of thermal similarity of climatic conditions is proposed for detecting non-specific changes in the thermal

regime such as changes in the seasonal pattern of monthly air temperature. The use of this indicator is illustrated with the case study of changes in the climatic conditions of Moscow. It is shown that Moscow climate of 1986-2015 cannot be considered as thermally similar to the Moscow climate of 1961-1990: the thermal analogue for Moscow climate of 1986-2015 is the climate of Bryansk region of 1961-1990. There are also some reasons to suppose that the thermal regime of Moscow in 2071-2100 would be similar to that of Belgorod region in 1961-1990. Thus, one might suppose that the changes in thermal regime that ecosystems of Moscow region would undergo in this century might be of the same magnitude as the changes that they withstood in the past century. This conclusion cannot be automatically extended to other regions. The future thermal regime of some regions may have no analogues in the past. Detection of such regions is an important direction for ecoclimatic monitoring.

Keywords. Informative indicators, climate change, Moscow climate.

Введение

В связи с предполагаемыми изменениями глобального климата становится актуальным мониторинг региональных эоклиматических изменений и возникает проблема выбора показателей для адекватной диагностики климатических изменений, имеющих экологическое значение (Bartlein et al., 1997; Williams et al., 2007; Ramírez-Villegas et al., 2011; Roberts and Hamann, 2012; Grenier et al., 2013; Beniston, 2014; Reu et al., 2014; Rohat et al., 2016).

Есть ряд показателей, по которым обычно судят о том, где климат теплее, а где холоднее: температура самого жаркого месяца, температура самого холодного месяца, среднегодовая температура и так далее. Эти показатели применяют и для характеристики изменений климата, которые могут произойти в результате глобального потепления. Например, глобальное потепление всей планеты, обычно оценивают по такому показателю как повышение среднегодовой температуры. Согласно последнему отчету Межправительственной комиссии по изменению климата она может вырасти на 4.8°C в конце 21 века, если ничего не будет сделано для стабилизации химического состава атмосферы (IPCC, 2013).

Однако, среднегодовая температура, так же как и другие показатели климатических условий, выделяет только один аспект теплового режима регионального климата. Намного более общей характеристикой теплового режима является сезонный ход среднемесячных температур. Сезонный ход температур имеет большое значение для функционирования экосистем (Alexandrov, 2014; Alexandrov et al., 2016). Изменения сезонного хода температур, даже если они не приводят к изменению среднегодовой температуры, могут оказывать заметное влияние на функционирование экосистем и распространение различных видов растений и животных. Поэтому для более адекватного мониторинга эоклиматических изменений необходим показатель, диагностирующий любые изменения сезонного хода температур.

Методы и материалы

В качестве такого общего показателя, т.е. показателя, отслеживающего любые изменения теплового режима, представляется целесообразным использовать показатель термической аналогичности, задаваемый следующим образом: $S = \max\{|t_{2,1}-t_{1,1}|, \dots, |t_{2,m}-t_{1,m}|, \dots, |t_{2,12}-t_{1,12}|\}s(t_{2,a}-t_{1,a})$, где $t_{1,m}$ и $t_{2,m}$ – среднемесячные температуры сравниваемых локальных климатов для месяца m , $t_{1,a}$ и $t_{2,a}$ среднегодовые температуры сравниваемых локальных климатов, $s(t_{2,a}-t_{1,a}) = -1$, когда $t_{2,a} < t_{1,a}$ (в противном случае оно равно 1). Показатель термической аналогичности (ПТА) диагностирует изменение любой из среднемесячных температур и характеризует абсолютную величину максимального расхождения сравниваемых графиков сезонного хода среднемесячных температур. Информативность ПТА иллюстрируется на примере Москвы (рис. 1).

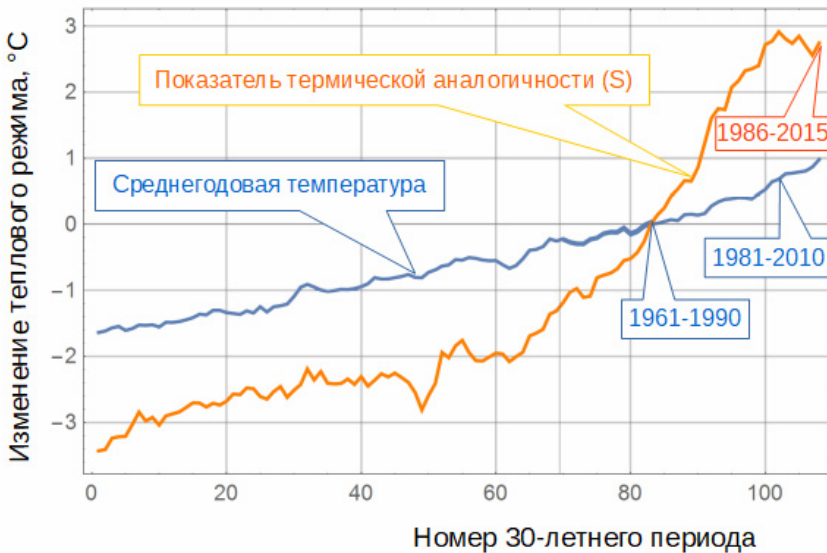


Рисунок 1. Динамика изменения теплового режима Москвы относительно периода 1961-90 гг.

период №1: 1879-1908, ..., период №62: 1941-1970, ..., период №82: 1961-1990, ..., период №102: 1981-2010.

Источники данных: Булыгина и др., 2017; Казаков, 2017

Как видно из рис. 1. среднегодовая температура росла медленнее, чем среднемесячная температура некоторых месяцев. К 1981-2010 гг. среднегодовая температура выросла по сравнению с периодом 1961-1990 гг. примерно на 1°C, а ПТА – более чем на 2.5°C. Это означает, что некоторые виды растений и животных, возможно, подверглись более значительному воздействию в результате изменения климата, чем это можно было бы предположить, исходя из изменения среднегодовой температуры.

ПТА может использоваться для выявления современных термических аналогов климатических регионов в будущем, при предполагаемом изменении глобального климата. Климатические условия, характерные для любого произвольно взятого климатического региона, являются проявлением глобального климата. Их совокупность отражает состояние климатической системы (Дымников и др., 2012). Современному состоянию климатической системы соответствует определенный набор региональных климатических условий, или, кратко, локальных климатов. Существенные изменения состояния климатической системы сопровождаются изменениями набора локальных климатов.

Так, например, в модели климатической системы MPI-ESM (Giorgetta et al., 2013; Schmidt et al., 2014) каждому состоянию климатической системы соответствует набор из 96×192 локальных климатов, т.е., значений климатических переменных в узлах Гауссовской сетки T63 (разрешение 1.875° , примерно 200 км). В климатической системе 1961-1990 гг. общее число локальных климатов, которые можно считать термически аналогичными, $-2 < S < 2$, московскому климату 1961-1990 гг., довольно велико. Регион, в котором тепловой режим аналогичен московскому, занимает обширную территорию от Новгорода до Нижнего Новгорода (рис. 2А). Однако, термических аналогов для климата Москвы 2071-2100 гг., соответствующего сценарию RCP 8.5, существенно меньше. Такой тепловой режим не является необычным для климатической системы 1961-1990 гг., но он имеет в ней гораздо меньшее распространение (рис. 2Б).

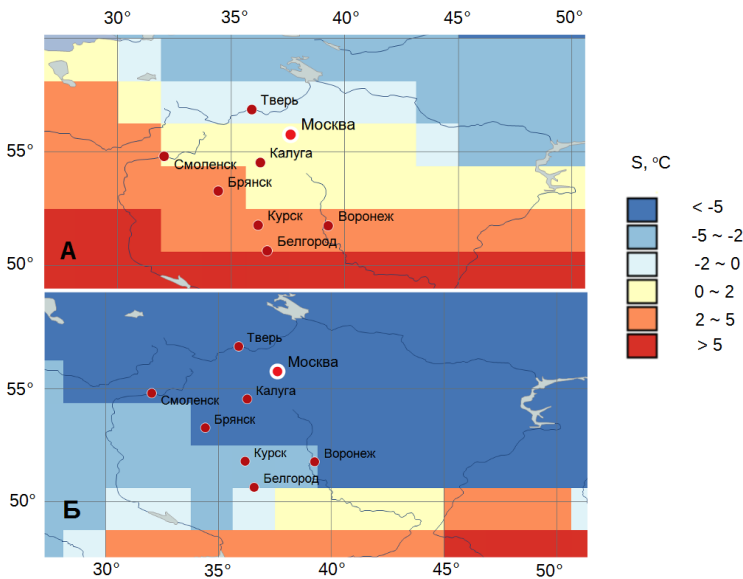


Рисунок 2. Термические аналоги ($-2 < S < 2$) московского климата 1961-90гг. (А) и московского климата 2071-2100гг. для сценария RCP 8.5 (Б) в наборе локальных климатов, соответствующих состоянию климатической системы в период 1961-90гг.

Отрицательные значения S соответствуют случаю, когда среднегодовая температура данного локального климата 1961-90гг. ниже предполагаемой среднегодовой температуры московского климата 2071-2100гг. Источник данных: результаты численных экспериментов на модели MPI-ESM (Giorgetta et al., 2013; Schmidt et al., 2014)

Набор локальных климатов в пространственно интерполированной глобальной климатологии CRU TS (New et al., 2011) дает в целом похожий результат (рис 3). Регион, в котором тепловой режим аналогичен климату Москвы в 1986-2015 гг. занимает гораздо меньшую территорию, чем регион термически аналогичный климату Москвы в 1961-1990 гг.

Более того, начиная с периода 1975-2005 гг., климат Москвы вряд ли можно считать термически аналогичным климату Москвы периода 1961-1990 гг., если принять $S=2$ в качестве порогового значения для разграничения тепловых режимов (рис. 1). Термическим аналогом московского климата 1986-2015 гг. в климатической системе 1961-1990 гг. является климат Брянской области, а не московского региона (рис. 3Б).

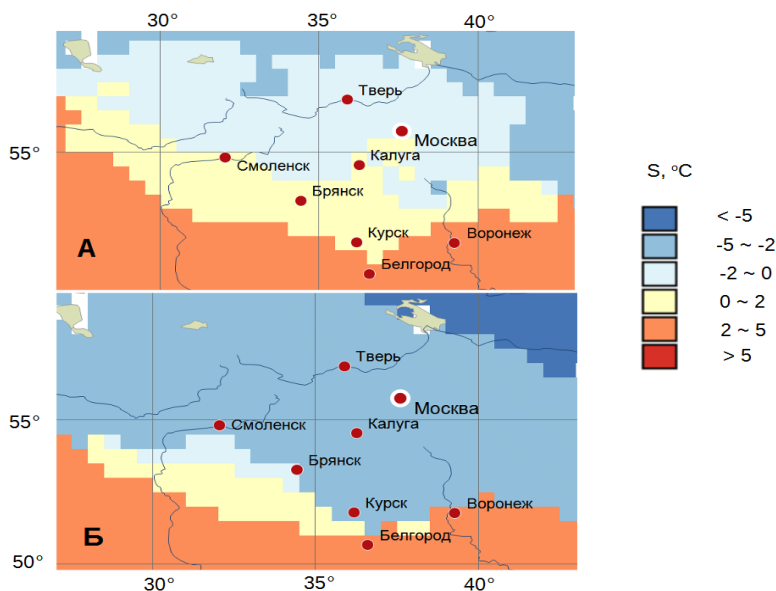


Рисунок 3. Термические аналоги ($-2 < S < 2$) московского климата 1961-90гг. (А) и московского климата 1986-2015гг. (Б) в наборе локальных климатов, соответствующих состоянию климатической системы в период 1961-90гг.

Отрицательные значения S соответствуют случаю, когда среднегодовая температура данного локального климата 1961-90гг. ниже среднегодовой температуры московского климата 1986-2015гг.

Источник данных: New et al., 2011.

Обнаружение термических аналогов будущего теплового режима Москвы (или других регионов) в наборах локальных климатов, соответствующих прошлым состояниям климатической системы имеет значение для оценки экологических последствий изменения климата. Во втором оценочном докладе по последствиям изменения климата на территории РФ (Росгидромет, 2014) воздействие предполагаемых изменений климата на распространение различных видов животных и растений оценивается по результатам расчетов, проведенных на модели BIOME4 (Bala et al., 2005) при глобальном потеплении на 2°C . Такого рода расчеты позволяют оценить смещение растительных зон, что дает определенное представление о том, как изменятся ареалы ряда видов животных и растений. Так, например, вывод о том, что “на ЕЧР и в Скандинавии

смешанный лес распространится на большие области севернее 60° с.ш.” (Росгидромет, 2014), предполагает вполне определенные изменения ареалов ряда видов растений и животных, типичных для зоны смешанных лесов. Аналогично, из того, что термическим аналогом климата Москвы 2071-2100 гг. является климат Белгородской области 1961-1990 гг. (рис. 2Б), можно предположить, что тепловой режим московского региона будет благоприятен для тех, видов растений и животных, которые распространены сейчас в Белгородской области.

Выводы

Сам по себе факт, что у предполагаемого будущего теплового режима Москвы есть аналоги в прошлом состоянии климатической системы, позволяет принять оптимистическую гипотезу, что природные экосистемы московского региона смогут адаптироваться к глобальным изменениям климата. К моменту написания этой статьи, автору не удалось обнаружить регионы, где предполагаемый будущий тепловой режим не имеет близких аналогов в прошлом состоянии климатической системы. Однако, не исключено, что такие регионы существуют. Выявление регионов, где формируется качественно новый, не имеющий исторических аналогов, тепловой режим, представляет собой перспективное направление для дальнейших исследований.

Другим перспективным направлением дальнейших исследований представляется применение ПТА для сравнительной оценки уровня воздействия предполагаемых изменений климата на природные экосистемы различных регионов РФ. В случае московского региона ПТА климатических условий 1961-1990гг. относительно климатических условий 2071-2100 гг. равен -7°C (рис. 2Б), а относительно климатических условий 1986-2015 гг. равен -3°C (рис. 3Б), следовательно, есть основания предполагать, что изменения теплового режима, которые предстоит претерпеть природным экосистемам московского региона в этом веке, будут сопоставимы с теми изменениями, которые они претерпели в прошлом веке. Этот вывод нельзя автоматически перенести на другие регионы. Не исключено, что некоторым регионам РФ предстоит перенести беспрецедентные изменения теплового режима.

Изменения теплового режима, вообще говоря, не ограничиваются изменением среднесезонных значений среднемесячных температур. Еще одной существенной характеристикой теплового режима является межгодовая изменчивость среднемесячных температур. Тепловой режим отдельно взятого года может существенно отличаться от теплового режима за 30-летний период. Например, в 1987 году средняя температура января в Москве была на 10°C ниже ее среднесезонного значения в период 1986-2015 гг. Поэтому анализ межгодовой изменчивости ПТА, безусловно, необходим для детальной оценки уровня воздействия предполагаемых изменений климата на природные экосистемы различных регионов РФ.

В заключение не лишним будет еще раз подчеркнуть, что ПТА представляет собой неспецифический показатель изменения теплового режима. Он предназначен для выявления регионов, где изменения климата становятся

настолько заметными, что могут оказывать воздействие на распространение отдельных видов растений и животных, или на некоторые аспекты функционирования экосистем. После того как такие регионы будут выявлены, придет время для оценки воздействия изменения климата с помощью специфических показателей, т.е. показателей, которые входят в определения экологических ниш видов растений и животных, встречающихся в изучаемом регионе. Другими словами, показатель, предлагаемый в этой статье, предполагается использовать для рекогносцировочного мониторинга экоклиматических изменений на территории РФ.

Благодарности

Автор с благодарностью признает существенный интеллектуальный вклад Г.С. Голицына в формирование общей концепции и рабочего плана проведенных исследований. Замечания анонимного рецензента помогли уточнить область применения результатов исследований. Рисунки 1 и 2 были подготовлены с помощью ГИС MapWindow 4.8.8 (<http://www.mapwindow.org/>) и ГИС слоев, предоставляемых Natural Earth (<http://www.naturalearthdata.com/about/terms-of-use/>).

Список литературы

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. 2017. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. – Электронный ресурс. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения 12 марта 2017).

Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М. 2012. Моделирование климата и его изменений: современные проблемы. – Вестник Российской Академии Наук, т. 82, № 3, с. 227–236.

Казakov К. 2017. Среднемесячные, среднегодовые, максимальные, минимальные значения температуры воздуха и осадков в формате .xls. – Электронный ресурс. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/data/27612.zip> (дата обращения 12 марта 2017).

Росгидромет РФ. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. 2014. – М., Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 58 с.

Alexandrov G.A. 2014. Explaining the seasonal cycle of the globally averaged CO₂ with a carbon-cycle model. – *Earth System Dynamics*, vol. 5. pp. 345-354.

Alexandrov G.A., Brovkin V.A., Kleinen T. 2016. The influence of climate on peatland extent in Western Siberia since the Last Glacial Maximum. – *Scientific Reports*, No. 6, article number: 24784, DOI:10.1038/srep24784. [www.nature.com/articles/srep24784]

Bala G. et al. 2005. Multicentury changes to the global climate and carbon cycle: Results from a coupled climate and carbon cycle model. – *Journal of Climate*, vol. 18, No. 21, pp. 4531-4544.

Bartlein P.J., Whitlock C. and Shafer S.L. 1997. Future climate in the Yellowstone National Park region and its potential impact on vegetation. – *Conservation Biology*, vol. 11(3), pp.782-792.

Beniston M. 2014. European isotherms move northwards by up to 15 km year⁻¹: using climate analogues for awareness raising. – *International Journal of Climatology*, vol. 34(6), pp.1838-1844.

Giorgetta M. A. et al. 2013. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the coupled model intercomparison project phase 5. – *J. Adv. Model. Earth Syst.*, vol. 5, p. 572–597.

Grenier P., Parent A.C., Huard D., Anctil F. and Chaumont D. 2013. An assessment of six dissimilarity metrics for climate analogs. – *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 52(4), pp.733-752.

IPCC 2013. Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections Supplementary Material RCP8.5 [van Oldenborgh, G.J., M. Collins, J. Arblaster, J.H. Christensen, J. Marotzke, S.B. Power, M. Rummukainen and T. Zhou (eds.)]. In: *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. 159 p.

New M., P.D. Jones, and M. Hulme. 2011. ISLSCP II Climate Research Unit (CRU) Monthly Climate Data. – In Hall, Forrest G., G. Collatz, B. Meeson, S. Los, E. Brown de Colstoun, and D. Landis (eds.). *Data Set*. Available on-line [<http://daac.ornl.gov/>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. doi:10.3334/ORNLDAAAC/1015

Ramírez-Villegas J, Lau C, Köhler A-K, Signer J, Jarvis A, Arnell N, Osborne T, Hooker J. 2011. Climate analogues: finding tomorrow's agriculture today. – Working Paper No. 12. Cali, Colombia. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).

Reu B., Zaehle S., Bohn K., Pavlick R., Schmidlein S., Williams J.W. and Kleidon A. 2014. Future no analogue vegetation produced by no analogue combinations of temperature and insolation. – *Global Ecology and Biogeography*, vol. 23(2), pp.156-167.

Roberts D.R. and Hamann A. 2012. Predicting potential climate change impacts with bioclimate envelope models: a palaeoecological perspective. – *Global Ecology and Biogeography*, vol. 21(2), pp.121-133.

Rohat G., Goyette S. and Flacke J. 2016. Twin climate cities — an exploratory study of their potential use for awareness-raising and urban adaptation. – *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, pp.1-17.

Schmidt G. A. et al. 2014. Using palaeo-climate comparisons to constrain future projections in CMIP5. – *Clim. Past*, vol. 10, p. 221–250.

Williams J.W., Jackson S.T. and Kutzbach J.E., 2007. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. – Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 104(14), pp. 5738-5742.

References

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. *Opisanie massiva dannykh srednemesiachnoi temperatury vozdukha na stantsiakh Rossii* [Description of the dataset of mean monthly air temperature at stations of Russia]. - Electronic resource. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#opisanie-massiva-dannykh> (data obrashcheniia 12 marta 2017).

Dymnikov V.P., Lykosov V.N., Volodin E.M. 2012. Modelirovanie klimata i ego izmenenii: sovremennye problemy [Modeling of climate and climate change: current issues]. *Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk – The Bulletin Of The Russian Academy Of Sciences*, vol. 82, no 3, pp. 227–236.

Kazakov K. *Srednemesiachnye, srednegodovye, maksimal'nye, minimal'nye znacheniiia temperatury vozdukha i osadkov v formate .xls*. [The average monthly, average annual, maximum and minimum values of air temperature and precipitation in the format .xls.] – Elektronnyi resurs. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/data/27612.zip> (data obrashcheniia 12 marta 2017).

Rosgidromet RF. *Vtoroi otsenochnyi doklad ob izmeneniiakh klimata i ikh posledstviakh na territorii RF* [Roshydromet, Russian Federation. The second evaluation report on climate changes and their effects on the territory of the Russian Federation]. 2014. Moscow, The Federal service for hydrometeorology and environmental monitoring Publ., 58 p.

Alexandrov G.A. 2014. Explaining the seasonal cycle of the globally averaged CO₂ with a carbon-cycle model. – *Earth System Dynamics*, vol 5. pp. 345-354.

Alexandrov G.A., Brovkin V.A., Kleinen T. 2016. The influence of climate on peatland extent in Western Siberia since the Last Glacial Maximum. – *Scientific Reports*, No.6, article number: 24784. DOI:10.1038/srep24784. [www.nature.com/articles/srep24784].

Bala G. et al. 2005. Multicentury changes to the global climate and carbon cycle: Results from a coupled climate and carbon cycle model. – *Journal of Climate*, vol. 18, No. 21, pp. 4531-4544.

Bartlein P.J., Whitlock C. and Shafer S.L. 1997. Future climate in the Yellowstone National Park region and its potential impact on vegetation. – *Conservation Biology*, vol. 11(3), pp.782-792.

Beniston M. 2014. European isotherms move northwards by up to 15 km year⁻¹: using climate analogues for awareness raising. – *International Journal of Climatology*, vol. 34(6), pp.1838-1844.

Giorgetta M. A. et al. 2013. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the coupled model intercomparison project phase 5. – *J. Adv. Model. Earth Syst.*, vol. 5, p. 572–597.

Grenier P., Parent A.C., Huard D., Anctil F. and Chaumont D. 2013. An assessment of six dissimilarity metrics for climate analogs. – Journal of Applied Meteorology and Climatology, vol. 52(4), pp.733-752.

IPCC 2013. Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections Supplementary Material RCP8.5 [van Oldenborgh, G.J., M. Collins, J. Arblaster, J.H. Christensen, J. Marotzke, S.B. Power, M. Rummukainen and T. Zhou (eds.)]. In: Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. 159 p.

New M., P.D. Jones, and M. Hulme. 2011. ISLSCP II Climate Research Unit (CRU) Monthly Climate Data. – In Hall, Forrest G., G. Collatz, B. Meeson, S. Los, E. Brown de Colstoun, and D. Landis (eds.). Data Set. Available on-line [<http://daac.ornl.gov/>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. doi:10.3334/ORNLDAAAC/1015

Ramírez-Villegas J, Lau C, Köhler A-K, Signer J, Jarvis A, Arnell N, Osborne T, Hooker J. 2011. Climate analogues: finding tomorrow's agriculture today. – Working Paper No. 12. Cali, Colombia. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).

Reu B., Zaehle S., Bohn K., Pavlick R., Schmidtlein S., Williams J.W. and Kleidon A. 2014. Future no analogue vegetation produced by no analogue combinations of temperature and insolation. – Global Ecology and Biogeography, vol. 23(2), pp.156-167.

Roberts D.R. and Hamann A. 2012. Predicting potential climate change impacts with bioclimate envelope models: a palaeoecological perspective. – Global Ecology and Biogeography, vol. 21(2), pp.121-133.

Rohat G., Goyette S. and Flacke J. 2016. Twin climate cities — an exploratory study of their potential use for awareness-raising and urban adaptation. – Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, pp.1-17.

Schmidt G. A. et al. 2014. Using palaeo-climate comparisons to constrain future projections in CMIP5. – Clim. Past, vol. 10, p. 221–250.

Williams J.W., Jackson S.T. and Kutzbach J.E., 2007. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. – Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 104(14), pp.5738-5742.

Статья поступила в редакцию: 14.03.2017

После переработки 03.05.2017