ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 490, № 1, с. 27–32

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.511

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ГЛОБАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В ГОЛОЦЕНЕ

© 2020 г. Академик РАН И. И. Мохов[1,2,3], А. В. Елисеев[1,2,4,*], В. В. Гурьянов[4]

Поступило 14.10.2019 г.
После доработки 14.10.2019 г.
Принято к публикации 18.10.2019 г.

На основе численных расчетов с глобальной климатической моделью оценены глобальные и региональные изменения климата в голоцене. Согласно полученным результатам, современная среднегодовая глобальная приповерхностная температура в последние десятилетия превысила соответствующие значения для предыдущих 10 тыс. л., в том числе в период так называемого “оптимума голоцена” (иначе – среднего голоцена, около 6 тыс. л.н.). При этом современные температурные режимы для отдельных регионов, в частности в Европе, могут не достигать еще уровня максимального потепления в среднем голоцене. Глобальные и региональные климатические изменения и изменения характеристик углеродного цикла в последнее столетие по модельным расчетам (с учетом антропогенных воздействий) существенно отличаются от изменений в предыдущие столетия и тысячелетия, когда ключевую роль играли естественные воздействия на климатическую систему.

Ключевые слова: голоцен, климатические изменения, моделирование, КМ ИФА РАН

DOI: 10.31857/S2686739720010065

На основе численных расчетов с глобальной климатической моделью оценены глобальные и региональные изменения климата в голоцене. Согласно полученным результатам, современный среднегодовой уровень глобальной приповерхностной температуры в последние десятилетия превысил соответствующие значения в течение предыдущих 10 тыс. лет, в том числе в период так называемого “оптимума голоцена” (иначе – среднего голоцена, около 6 тыс. л.н.). При этом современные температурные режимы для отдельных регионов (в частности, для европейского региона) могут не достигать еще уровня максимального потепления в среднем голоцене. Глобальные и региональные климатические изменения и изменения характеристик углеродного цикла в последнее столетие по модельным расчетам (с учетом антропогенных воздействий) существенно отличаются от изменений в предыдущие столетия и тысячелетия, когда ключевую роль играли естественные воздействия на климатическую систему, в том числе из-за изменения параметров орбиты Земли вокруг Солнца и солнечной активности.

Для оценки глобальных и региональных изменений климата в течение последних 10 тыс. лет в голоцене проведены численные расчеты с глобальной климатической моделью Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) [1–4]. Численные расчеты с КМ ИФА РАН проводились с учетом изменений параметров орбиты Земли в соответствии с [5], потока солнечного излучения, оптической толщины стратосферных (вулканических) аэрозолей (только для 501–2000 гг.), содержания парниковых газов (CO_2, CH_4, N_2O) в атмосфере, площади распространения пастбищ и пашень и плотности населения. При учете изменений содержания сульфатного аэрозоля в тропосфере предполагалось, что его уровень в середине XIX в. характеризует распределение сульфатов естественного происхождения для всего голоцена. Более подробно использованные данные описаны в табл. 1.

По расчетам с КМ ИФА РАН в целом адекватно воспроизводятся вариации приповерхностной температуры в XX в. При этом недооценивается межгодовая и междесятилетняя изменчивость (правая панель рис. 1), что характерно для современных климатических моделей промежуточной

[1] *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии наук, Москва, Россия*
[2] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[3] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия*
[4] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*
**E-mail: eliseev@ifaran.ru*

Таблица 1. Данные о внешних воздействиях на земную систему, использованные при численных расчетах с КМ ИФА РАН

Переменная	Источник данных
Солнечная постоянная	https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/climate_forcing/solar_variability/steinhilber2009tsi.txt
Оптическая толщина вулканических аэрозолей в стратосфере	501–2000 гг. н.э.: https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/climate_forcing/volcanic_aerosols/gao2008ivi2/IVI2LoadingLatHeight501-2000_Version2_Oct2012.txt (до 500 г. н.э. не учитывается)
Содержание CO_2 в атмосфере	10–2 тыс. л.н.: https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/antarctica2015co2.xls 2–0 тыс. л.н. https://www.geosci-model-dev.net/10/2057/2017/gmd-10-2057-2017-supplement.zip
Содержание CH_4 в атмосфере	10–2 тыс. л.н.: среднее из https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/epica_domec/dc_ch4_hol_fl02.txt и https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/greenland/summit/grip/gases/gripch4.txt 2–0 тыс. л.н.: https://www.geosci-model-dev.net/10/2057/2017/gmd-10-2057-2017-supplement.zip
Содержание N_2O в атмосфере	10–2 тыс. л.н.: https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/greenland/summit/gisp2/gases/gisp2_n2o.txt 2–0 тыс. л.н. https://www.geosci-model-dev.net/10/2057/2017/gmd-10-2057-2017-supplement.zip
Содержание сульфатных аэрозолей в тропосфере	1850–2000 гг.: https://tntcat.iiasa.ac.at/RcpDb/download/Aerosols/ (до 1850 г. содержание постоянно)
Площадь пашень и пастбищ	HYDE-3.2 (ftp://ftp.pbl.nl/hyde/hyde3.2/baseline)
Плотность населения	HYDE-3.2 (ftp://ftp.pbl.nl/hyde/hyde3.2/baseline)

сложности, к которым относится КМ ИФА РАН [1–4]. Глобальная приповерхностная температура по расчетам с КМ ИФА РАН увеличивается в XX в. на 0.6 °C в разумном соответствии с оценкой около 0.7°C по данным HadCRUT4 (www.cru.uea.ac.uk/data). Различие оценок по модельным расчетам и по данным наблюдений можно связать с вкладом естественной изменчивости.

На левой панели рис. 1 представлены результаты модельных расчетов изменений глобальной приповерхностной температуры в голоцене. Согласно результатам расчетов с КМ ИФА РАН, значения глобальной приповерхностной температуры в последние десятилетия и столетие в целом заметно выше, чем в предыдущие столетия и тысячелетия в голоцене. Следует отметить, что на глобальном уровне не проявляется заметное увеличение приповерхностной температуры в “оптимуме голоцена” – в среднем голоцене. Это согласуется с современными данными палеореконструкций [6, 7] и другими расчетами с климатическими моделями [7]. Результаты температурных расчетов с КМ ИФА РАН могут быть скорректированы, в частности, при учете сдвига вегетационных зон. Тем не менее, модель в целом корректно на количественном и качественном уровне воспроизводит полученную в [6] широтную зависимость изменения приповерхностной температуры над сушей Северного полушария в голоцене вплоть до начала малого ледникового периода (рис. 3).

В отсутствие значимого увеличения температуры в оптимуме голоцена на глобальном уровне проявляются температурные максимумы в среднем и раннем голоцене на региональном уровне, в частности для европейских регионов летом (рис. 2). По расчетам с КМ ИФА РАН в целом воспроизводятся долгопериодные региональные изменения приповерхностной температуры в течение последних двух тысячелетий согласно реконструкциям PAGES2k (Past Global Changes, the 2k Network; http://pastglobalchanges.org/science/wg/2k-network/data).

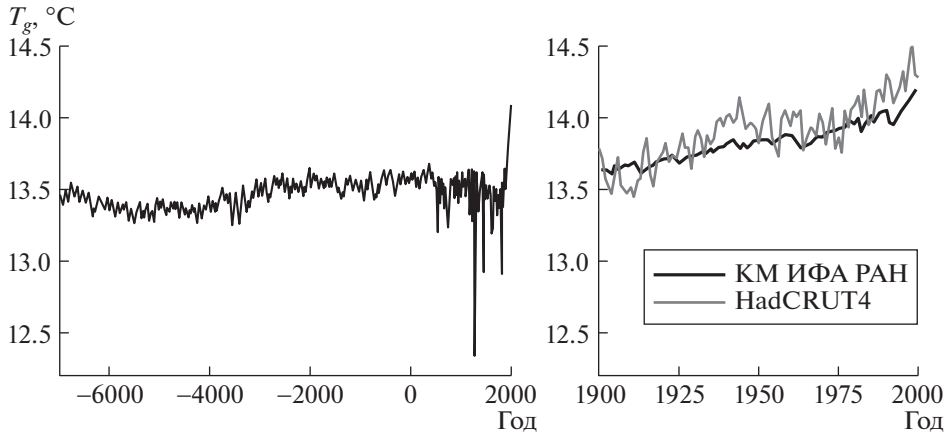

Рис. 1. Изменения глобальной приповерхностной температуры (°C) по модельным расчетам в голоцене (слева) и отдельно для XX в. (справа) в сопоставлении с данными HadCRUT4.

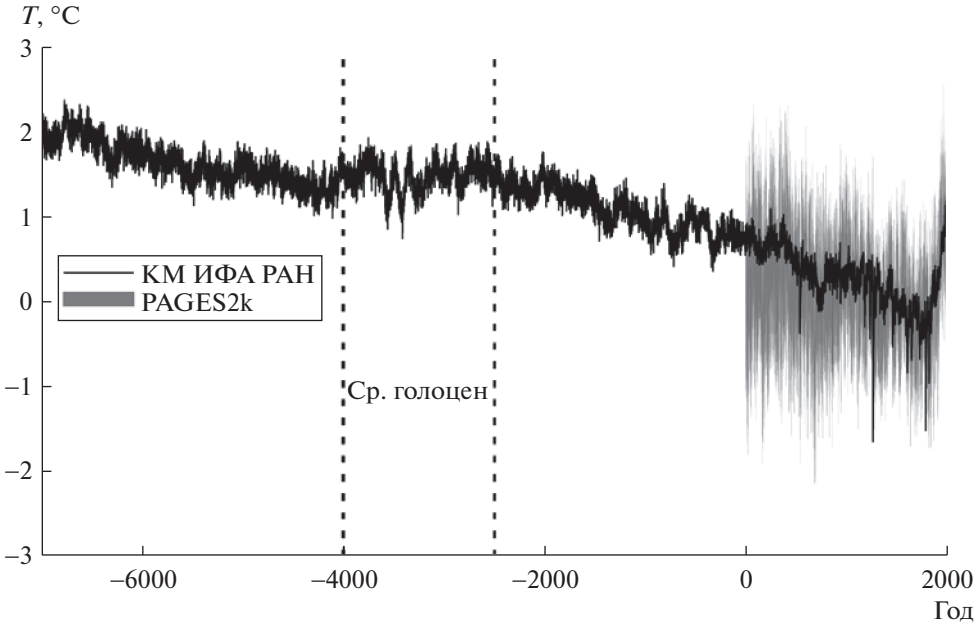

Рис. 2. Изменения приповерхностной температуры (°C) летом в европейском регионе (35°–70° с.ш.; 10°–40° в.д.) по модельным расчетам в сопоставлении с реконструкциями PAGES2k. Представлены температурные аномалии относительно средней приповерхностной температуры летом для периода 1500–2000 гг. Вертикальными пунктирными линиями выделен интервал 6–4.5 тыс. л.н., соответствующий среднему голоцену.

Согласно рис. 2, значения приповерхностной температуры летом в европейском регионе (35°–70° с.ш.; 10°–40° в.д.) по модельным расчетам с их быстрым ростом в последнее столетие приблизились к концу XX в. к их максимальным значениям в период среднего голоцена (6.0–4.5 тыс. л.н.). На глобальном же уровне значения приповерхностной температуры в конце XX в. по модельным расчетам уже заметно превышали максимальные значениям в период 6.0–4.5 тыс. л.н. (рис. 1). Это связано со значительной пространственной неоднородностью климатических изменений с существенными различиями для разных сезонов.

На рис. 3 приведены широтно-долготные изменения среднегодовой приповерхностной температуры в среднем голоцене относительно последнего 30-летия XX в. по модельным расчетам. Согласно полученным модельным результатам, для большинства регионов Земли к концу XX в. значения приповерхностной температуры превысили соответствующие значения в среднем голоцене, за исключением арктических широт, достаточно протяженных областей в Северной Евра-

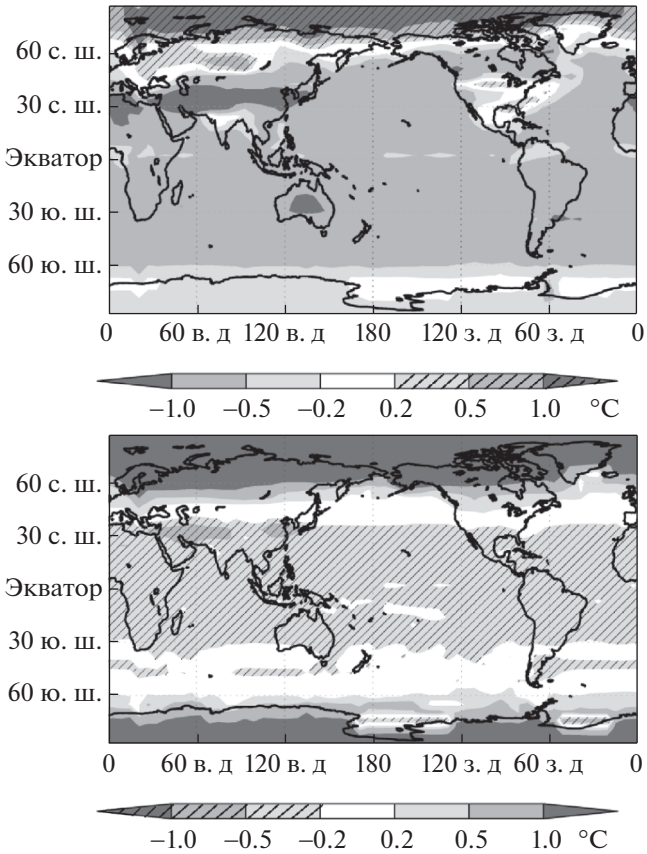

Рис. 3. Изменения среднегодовой приповерхностной температуры (°C) в среднем голоцене (6.0–4.5 тыс. л.н.) относительно 1970–1999 гг. (верхний рисунок) и за период от 9 тыс. л.н. до 1500 г. по расчетам с КМ ИФА РАН.

зии, а также среднеширотных и субтропических регионов Северной Америки. В частности, к концу XX в. приповерхностная температура по модельным расчетам в субполярных и средних широтах Евразии была больше ее значения в среднем голоцене летом и меньше зимой. По модельным расчетам отмечены существенные различия для Евразии и Северной Америки. Следует отметить, что оцененные с использованием КМ ИФА РАН изменения климата среднего голоцена относительно конца XX в. зимой близки к оценкам, полученным в рамках проекта PMIP3 (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project, phase 3 – см. рис. 5.11 из [8]). При этом летом отклик в анализируемой версии КМ ИФА РАН в среднем голоцене оказывается заметно меньше соответствующего в моделях ансамбля PMIP3.

Полученные в [9–11] модельные результаты свидетельствуют о том, что выявленные в последние годы новые геофизические явления с образованием кратеров на Ямале можно объяснить повышением приповерхностной температуры в регионах Северной Евразии, в частности на Ямале (с диссоциацией реликтовых гидратов, “переживших” потепление в оптимуме голоцена). Согласно полученным оценкам при антропогенных сценариях в XXI в. можно ожидать существенное увеличение риска подобных эффектов в континентальной криолитозоне Северного полушария [10]. Следует отметить, что сделанные оценки зависят от того, насколько точно современные модели способны воспроизводить климатические условия оптимума голоцена.

Среднее количество осадков по расчетам с КМ ИФА РАН глобально – в пределах неопределенности оценок по современным данным – немного меньше среднего количества осадков (примерно на 5%), чем по данным GPCP-2.3 (Global Precipitation Climatology Project, version 2.3; https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcp.html). Подобная неопределенность воспроизведения осадков характерна для современных моделей Земной системы [12].

Глобальная площадь природных пожаров по модельным расчетам в целом увеличивается во время голоцена в связи с увеличением частоты антропогенных возгораний (рис. 4). При этом во второй четверти XX в. площадь пожаров заметно уменьшается, а с середины XX в. – растет. Для последних десятилетий модельные оценки общей

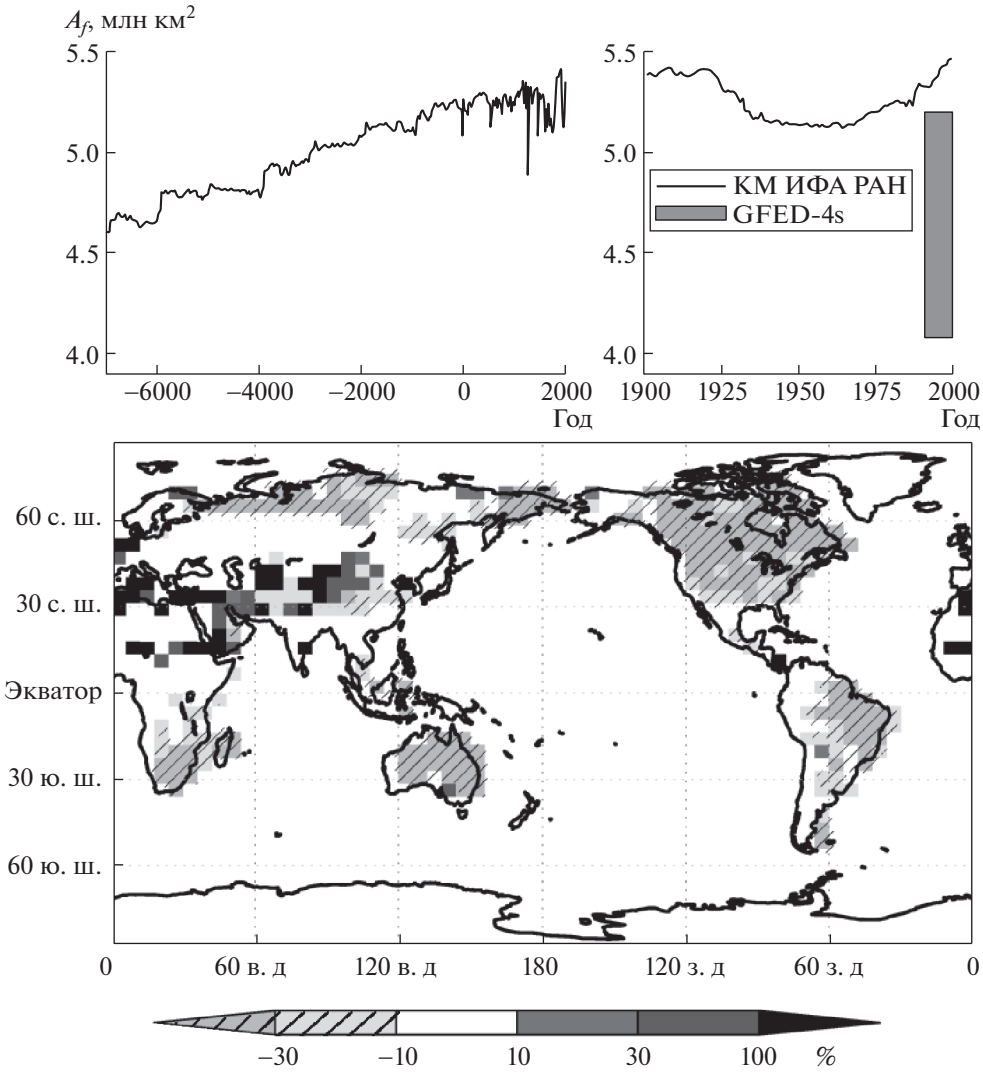

Рис. 4. Изменения глобальной площади выгорания из-за природных пожаров (A_f, млн км^2) по модельным расчетам в голоцене (слева вверху) и отдельно для XX в. (справа вверху) в сопоставлении с диапазоном неопределенности по данным GFED4 для периода 2001–2010 гг. Представлены также (на нижней панели) относительные (в %) изменения площади выгорания в период 6–4.5 тыс. л.н. (относительно 1970–1999 гг.).

площади пожаров немного выше, чем по данным GFED-4 (Global Fire Emission Database, version 4; https://www.globalfiredata.org/data.html). Стоит отметить, что в настоящее время только в нескольких моделях земной системы есть интерактивные блоки, связанные с динамикой природных пожаров. При этом разброс в разных модельных оценках площади природных пожаров значительный [13].

На рис. 4 представлены также изменения площади природных пожаров в период 6–4.5 тыс. л.н. относительно конца XX в. (1971–1999 гг.). Согласно рис. 4 (нижняя панель), увеличение площади природных пожаров в голоцене отмечается в большинстве регионов, за исключением юга Евразии, и в целом согласуется с оценкой интенсивности природных пожаров по данным отложений древесного угля [14], а также с результатами расчетов по модели земной системы CLIMBA [15].

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Данная работа выполнена в рамках проектов РФФИ (17–05–01097, 17–29–05098, 18–05–00087, 18–05–60111, 18–45–160006) с использованием результатов, полученных в рамках программы РАН “Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования”. Сравнительный анализ климатических режимов в оптимуме голоцена и в настоящее время выполнялся в рамках проекта РНФ (19–17–00240).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мохов И.И., Елисеев А.В.* // ДАН. 2012. Т. 443. № 6. С. 732–736.
2. *Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. и др.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 5. С. 543–549.
3. *Елисеев А.В., Плосков А.Н., Чернокульский А.В. и др.* // ДАН. 2019. Т. 485. № 1. С. 76–82.
4. *Eliseev A.V., Mokhov I.I.* // Proc. SPIE. 2019. V. 11208. P. 1351–1361.
5. *Berger A.L.* // J. Atmos. Sci. 1978. V. 35. № 12. P. 2362–2367.
6. *Marsicek J., Shuman B.N., Bartlein P.J., et al.* // Nature. 2018. V. 554. № 7690. P. 92–96.
7. *Liu Z., Zhu J., Rosenthal Y., et al.* // Proc. Nat. Acad. Sci. 2014. V. 111. № 34. P. E3501–E3505.
8. Climate Change 2013: The Physical Science Basis / T. Stocker, *D. Qin, G.K. Plattner,* Eds. Cambridge; N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2007. 1535 p.
9. *Аржанов М.М., Мохов И.И., Денисов С.Н.* // ДАН. 2016. Т. 468. № 5. С. 572–574.
10. *Аржанов М.М., Мохов И.И.* // ДАН. 2017. Т. 476. № 4. С. 456–460.
11. *Mokhov I I.* // IOP Publ.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. 012037.
12. *Liu Z., Mehran A., Phillips T.J., et al.* // Clim. Res. 2014. V. 60 № 1. P. 35–50.
13. *Kloster S., Lasslop G.* // Glob. Planet. Change. 2017. V. 150. P. 58–69.
14. *Marlon J.R., Kelly R., Daniau A.-L., et al.* // Biogeosciences. 2016. V. 13. № 11. P. 3225–3244.
15. *Brücher T., Brovkin V., Kloster S., et al.* // Clim. Past. 2014. V. 10. № 2. P. 811–824.

MODEL ESTIMATES OF GLOBAL AND REGIONAL CLIMATE CHANGES IN THE HOLOCENE

Academician of the RAS I. I. Mokhov[a,b,c], A. V. Eliseev[a,b,d,#], and V. V. Guryanov[d]

[a] *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[b] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[c] *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation*

[d] *Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russian Federation*

[#] *E-mail: eliseev@ifaran.ru*

Based on simulations with a global climate model, estimates of global and regional climate changes during the Holocene are performed. According to the obtained results, the contemporary global and annual mean surface air temperature in the last decades exceeded the respective values during the previous 10 kyr, including the so called 'Holocene Optimum' (or Mid-Holocene, circa 6 kyr before present). However, in some regions, e.g., in Europe, temperature still may be below the maximum warming level in the mid-Holocene. Global and regional climate changes and changes of the carbon cycle characteristics in the last century in the model simulations (taking into account anthropogenic forcing) are principally different from the changes in previous centuries and millennia, when the natural forcings played the key role in climate.

Keywords: Holocene, climate changes, modeling, IAP RAS CM