

УДК 551.58

## КЛИМАТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫЙ МИНИМУМ ПОТРЕБНОСТИ В ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ В ГОРОДАХ ЦЕНТРА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

© 2020 г. Г. Г. Александров\*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия*

*\*e-mail: gleb@ifaran.ru*

Поступила в редакцию 02.07.2020 г.

После доработки 20.07.2020 г.

Принята к публикации 05.08.2020 г.

Минимальный уровень энергопотребления в городах Русской равнины в значительной степени определяется климатическими условиями, так как отопление зданий в зимний период является здесь жизненной необходимостью. Поэтому в качестве экономически значимого показателя регионального изменения климата предлагается использовать удельную потребность в тепловой энергии (УПТ) – оценку климатически обусловленного минимума потребности в энергии для отопления одного квадратного метра жилой площади. Расчеты УПТ по данным численных экспериментов на климатической модели INM-CM5.0 указывают на возможное усиление тенденции к снижению УПТ, наблюдаемой в городах Русской равнины в период 1950–2014 гг. Предлагаемый показатель позволяет по данным численных экспериментов на моделях климатической системы оценить масштаб проблемы, возникающей в связи с необходимостью адаптации городских энергосистем к снижению энергозатрат на отопление.

**Ключевые слова:** модели климатической системы, изменение региональных климатических условий, глобальное потепление, энергопотребление

**DOI:** 10.31857/S0002351520060024

### ВВЕДЕНИЕ

Изменение климатических условий в современном мире воспринимается как потенциальная угроза социально-экономическому укладу многих стран, которую, хотя и невозможно в полной мере оценить, но к которой можно адаптироваться [1]. Урбанизированные территории, т.е. большие города, первыми начинают испытывать последствия изменений климата, потому что они планировались, учитывая климатические условия прошлого, а не будущего, которое стало реальностью в настоящее время. В этой статье автор оценивает климатически обусловленные изменения потребления энергии в городах Русской равнины, основываясь на данных численных экспериментов, поставленных на климатической модели Института вычислительной математики РАН [2].

Значительная часть энергопотребления в Москве и других городах Русской равнины связана с необходимостью отопления зданий в период с ноября по апрель [3]. Энергозатраты, необходимые для отопления зданий, нередко оцениваются по такому показателю климатических условий, как градусо-сутки отопительного периода (ГСОП), который вычисляется по средней температуре и дли-

тельности отопительного периода [4, 5]. В Москве, например, длительность отопительного периода в 2005–2014 гг. варьировала в диапазоне от 197 до 221 дня [4], а ГСОП в период 2009–2014 гг. варьировал в диапазоне от 3400 до 4200°С сут.

Однако, использование ГСОП для оценки влияния изменения климата на энергопотребление сопряжено с определенными сложностями. Этот показатель использует такое неоднозначное понятие, как длительность отопительного периода. В РФ принято считать, что отопительный период начинается после пятнадцатки, в течение которой среднесуточная температура воздуха не превышала 8°С, и оканчивается после пятнадцатки, в течение которой среднесуточная температура воздуха превышала 8°С. Оценить с помощью климатических моделей изменение сроков начала и конца отопительного периода, определяемых таким образом, непростая задача. С другой стороны, в строительной климатологии [6] продолжительность и средняя температура отопительного периода рассчитывается по годовому ходу среднемесячной температуры воздуха, что говорит о возможности оценки влияния изменения клима-

та на энергопотребление непосредственно по данным о среднемесячной температуре.

Цель настоящего исследования состояла в том, чтобы оценить возможность усиления обнаруженной тенденции к снижению удельной потребности в тепловой энергии (УПТ) в городах Русской равнины, основываясь на результатах численных экспериментов, поставленных на моделях климатической системы, в частности, на модели INM-CM5 [2]. Для этой цели метод расчёта климатически обусловленного минимума энергопотребления [7] применялся к перспективным оценкам изменения среднемесячной температуры воздуха в центральной части Русской равнины, которые были сделаны Володиным и Грицуном [2] для узлов географической сетки координат с разрешением  $2^\circ$  по долготе и  $1.5^\circ$  по широте при различных сценариях социально-экономического развития (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5).

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УДЕЛЬНОЙ ПОТРЕБНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Среди данных численных экспериментов, проведенных на моделях климатической системы, наиболее доступными представляются данные об изменении среднемесячной температуры воздуха. Они позволяют охарактеризовать влияние изменений климата на энергопотребление, используя предложенный ранее показатель удельной потребности тепловой энергии (УПТ) [7].

УПТ представляет собой оценку климатически обусловленного минимума потребности в энергии для отопления одного квадратного метра жилой площади и рассчитывается по среднемесячной температуре воздуха (СМТ):

$$\text{УПТ} = \sum_{m=1}^{12} h \times \max(T_0 - T_m, 0),$$

где  $T_m$  – среднемесячная температура,  $T_0$  – температура начала и окончания отопительного периода ( $T_0 = 14^\circ\text{C}$ ),  $h$  – энергия, требуемая в месяц для отопления  $1 \text{ м}^2$  на  $1^\circ\text{C}$  выше, чем наружная температура ( $h = 1.8 \text{ кВтч} (\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})^{-1}$ ).

Значение  $h$  определяется, исходя из методики расчета энергопотребления в системах теплоснабжения помещений [8]. Значение  $T_0$  основывается на результатах экспериментальных исследований [9], которые показывают, что в те месяцы года, когда СМТ опускается ниже  $14^\circ\text{C}$ , необходимо включать отопление, чтобы температура в офисе или жилом помещении не опускалась ниже значения ( $18^\circ\text{C}$ ), установленного санитарными правилами и нормами [10, 11].

Ранее было показано [7], что удельная потребность тепловой энергии (УПТ) в период 1951–

2018 в Москве в среднем составляла  $206 \text{ кВтч/м}^2$ , в Санкт-Петербурге –  $202 \text{ кВтч/м}^2$ , в Берлине –  $120 \text{ кВтч/м}^2$ , в Лондоне –  $86 \text{ кВтч/м}^2$ , в Осло –  $66 \text{ кВтч/м}^2$ . В течение этого периода УПТ снижалось в Москве со средней скоростью  $0.63 \text{ кВтч/м}^2$  в год, в Санкт-Петербурге –  $0.7 \text{ кВтч/м}^2$  в год, в Берлине –  $0.32 \text{ кВтч/м}^2$  в год, в Лондоне –  $0.45 \text{ кВтч/м}^2$  в год, а в Осло –  $0.13 \text{ кВтч/м}^2$  в год.

Согласно некоторым оценкам изменения энергетического баланса Европы, тенденция к снижению энергопотребления, связанного с отоплением, будет наблюдаться и дальше, и к 2050 году энергозатраты на отопление уменьшатся на 9–14% в зависимости от сценария изменения климата [12].

Сценарии социального-экономического развития описывают связи между социально-экономическими и технологическими процессами, которые имеют прямые климатические последствия [13]. Сценарии SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 отличаются друг от друга по темпам роста мировой экономики, по уровню региональной неравномерности экономического развития, энергоёмкости и ресурсоёмкости производства, а также по эффективности климатического регулирования.

Сценарий SSP1-2.6 предполагает устойчивое развитие и высокие темпы роста мировой экономики, в частности, существенное увеличение доходов и снижение финансового неравенства как между странами, так внутри стран. Этот сценарий также предполагает снижение энергоёмкой и ресурсоёмкой сельскохозяйственной продукции, усиление контроля за загрязнением воздуха, что, в частности, снижает выбросы парниковых газов, и радиационный форсинг  $2.6 \text{ Вт/м}^2$  (т.е. повышение средней глобальной температуры на  $1.7^\circ\text{C}$  к концу века).

Сценарий SSP2-4.5 предполагает умеренный рост населения и медленную конвергенцию уровня доходов среди стран, увеличение энергоёмкой и ресурсоёмкой сельскохозяйственной продукции, а также продолжающийся рост выбросов парниковых газов. Предполагается также сокращение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу будет происходить в соответствии с современными тенденциями, т.е. в основном в странах с высокими доходами, а странами с низкими доходами они будут возрастать до уровня стран с высокими доходами, при этом радиационный форсинг составит  $4.5 \text{ Вт/м}^2$  (что соответствует повышению средней глобальной температуры на  $4^\circ\text{C}$  к концу века).

Сценарий SSP3-7.0 предполагает сильное неравенство между странами, низкий рост глобального ВВП, сосредоточенный в странах с высокими доходами, высокий рост населения в странах с низкими и средними доходами, возврат к исполь-

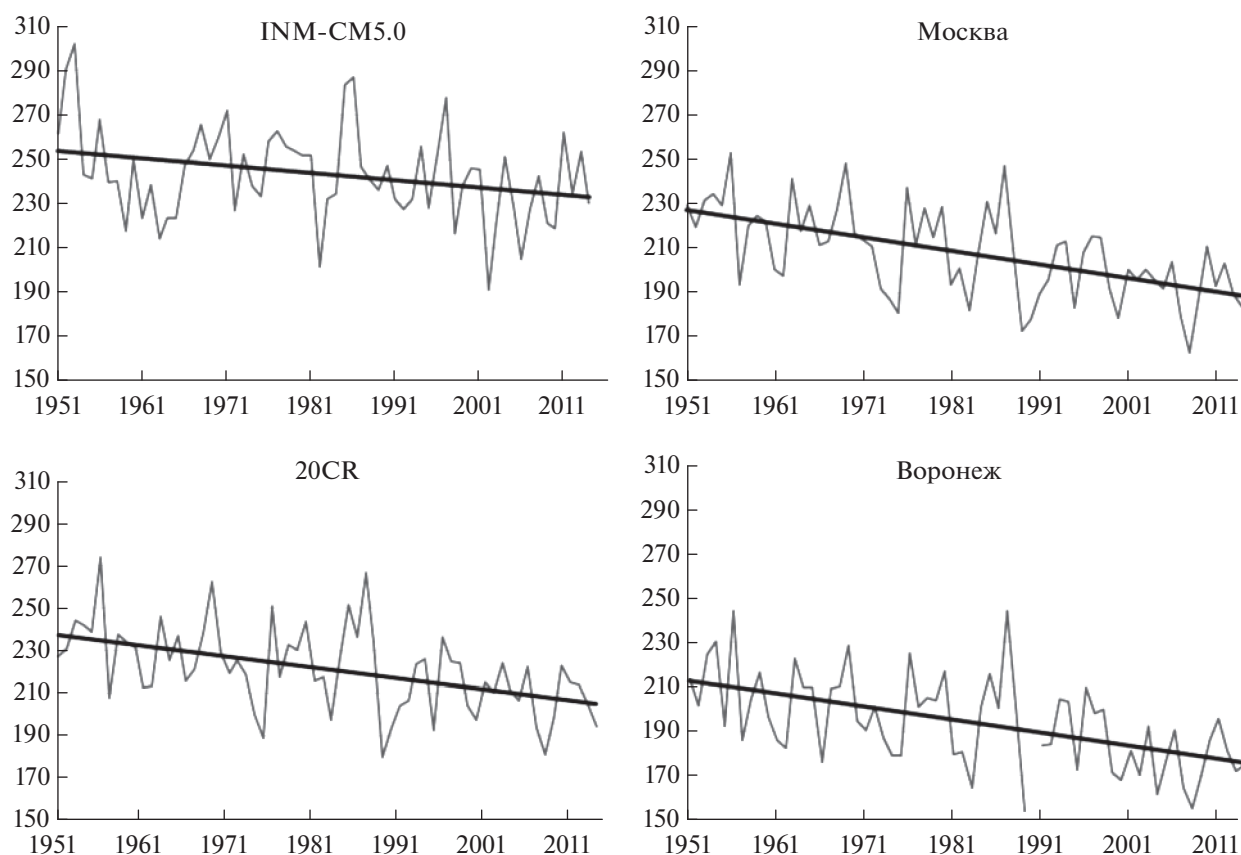


Рис. 1. Изменение УПТ в центральной части Русской равнины в период с 1951 по 2014 год, по данным моделирования (INM-CM5.0), реанализа (20CR), и метеонаблюдений (Москва, Воронеж).

зованию угля в энергетике, малую эффективность контроля за загрязнением воздуха и выбросами парниковых газов, а также за изменением землепользования. Также предполагается, что международное регулирование сменяется региональным, что приводит к высокому уровню выбросов и радиационному форсингу  $7.0 \text{ Вт/м}^2$  (т.е. повышению средней глобальной температуры на  $4.5^\circ\text{C}$  к концу века).

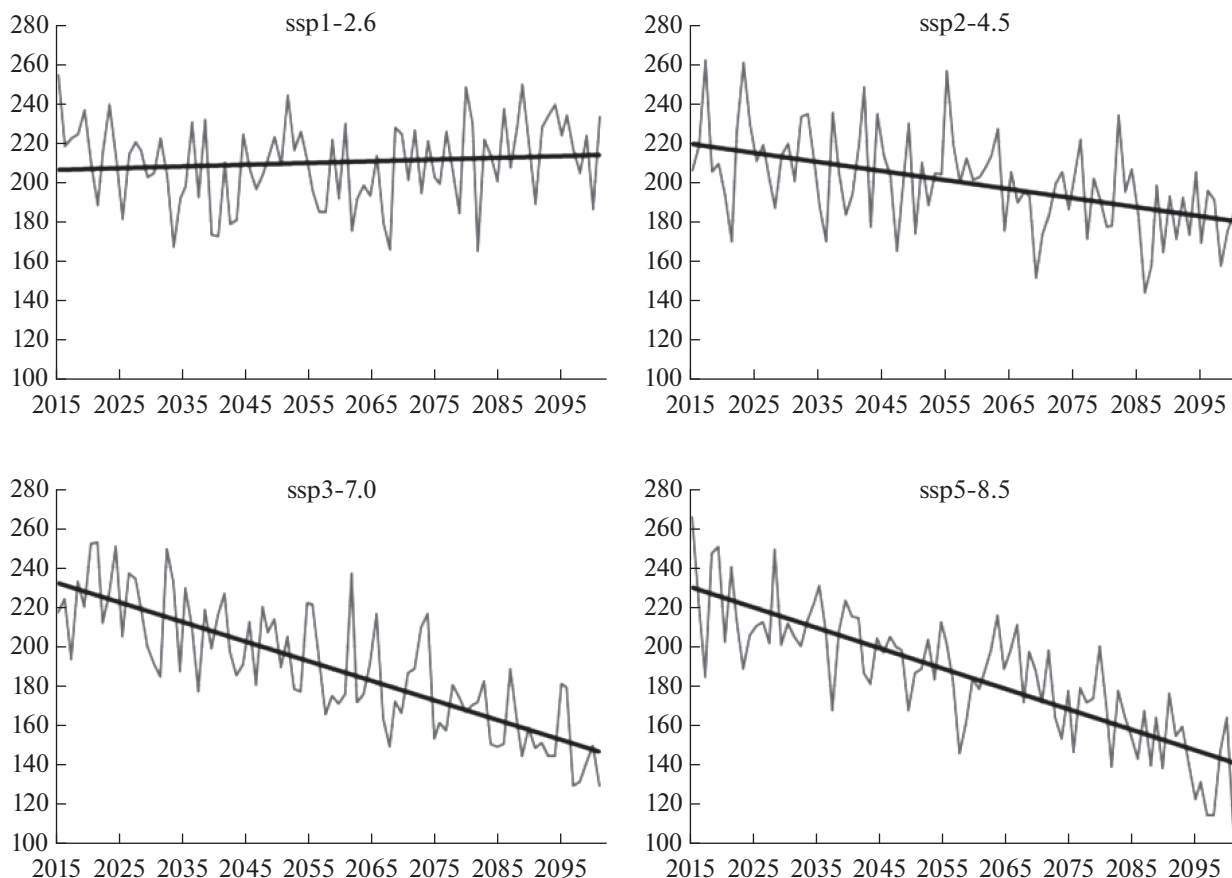
Сценарий SSP5-8.5 предполагает выравнивание уровня экономического развития между странами и высокие темпы роста мировой экономики, основанные на использовании ископаемых топлив, что ведет к высокому радиационному форсингу  $8.5 \text{ Вт/м}^2$  (т.е. повышению средней глобальной температуры на  $4.9^\circ\text{C}$  к концу века).

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

При расчетах УПТ для вышеуказанных сценариев использовались данные о среднемесячной приземной температуре с 2015 по 2100 г., предоставляемые Программой по исследованию мирового климата (WCRP) [14, 15], осредненным для центральной части Русской равнины, т.е. по уз-

лам географической сетки INM-CM5.0, находящимся между  $31^\circ$  и  $42^\circ$  в.д. и между  $51^\circ$  и  $59^\circ$  с.ш. Для оценки адекватности модельного описания наблюдаемых изменений климата использовались данные реанализа 20CR [16]. Кроме того, чтобы понять уровень воздействия предполагаемых изменений УПТ на энергосистемы городов Русской равнины, были вычислены значения УПТ для 1951–2014 гг.

Представленные на рис. 1 результаты расчетов УПТ по данным численных экспериментов на INM-CM5.0 для периода 1951–2014 гг. показывают, УПТ в этот период снижалось со скоростью  $0.33 \text{ кВтч/м}^2$  в год, т.е. существенно медленнее, чем УПТ, рассчитанное по данным метеонаблюдений [17]. В Москве в период 1951–2014 гг. по расчетам, основанным на данных метеонаблюдений, скорость снижения УПТ составила  $0.62 \text{ кВтч/м}^2$  в год, в Воронеже скорость снижения УПТ составила  $0.59 \text{ кВтч/м}^2$  в год, в Костроме —  $0.63 \text{ кВтч/м}^2$  в год, в Смоленске —  $0.68 \text{ кВтч/м}^2$  в год, в Новгороде и Тамбове —  $0.41 \text{ кВтч/м}^2$  в год. Относительно медленное снижение УПТ в Новгороде и Тамбове может быть частично объяснено отсутствием данных после 1989 года. Данные



**Рис. 2.** Изменение УПТ для центральной части Русской равнины, основанное на климатической модели INM-5.0 для разных сценариев SSP до конца XXI века.

по Костроме и Смоленску тоже содержат пропуски, но не столь существенные: с 1990 по 2005 и с 1990 по 2004 соответственно. УПТ, рассчитанное по данным реанализа 20CR, снижалось со скоростью  $0.51 \text{ кВтч/м}^2$  в год, т.е. быстрее, чем УПТ, рассчитанное по данным численных экспериментов на INM-CM5.0, но медленнее, чем в Москве.

Расчеты, проведенные для периода 2015–2100 гг., показали (рис. 2), что скорость снижения УПТ в центральной части Русской равнины существенно зависит от сценария социально-экономического развития. При сценарии SSP5-8.5 УПТ снижается со скоростью  $1.03 \text{ кВтч/м}^2$  в год, при сценарии SSP3-7.0 – со скоростью  $0.99 \text{ кВтч/м}^2$  в год, при сценарии SSP2-4.5 – со скоростью  $0.46 \text{ кВтч/м}^2$  в год, а при сценарии SSP1-2.6 – незначительно растет ( $0.08 \text{ кВтч/м}^2$  в год). Таким образом, все сценарии, за исключением SSP1-2.6, предполагают более быстрый рост УПТ, чем в период 1951–2014 гг., и снижение УПТ к на 18–39% концу XXI века и на 8–16% к середине века.

Однако, следует принять во внимание, что данные численных экспериментов на INM-CM5 предоставляют информацию об изменении при-

земной температуры в узлах географической сетки координат с разрешением  $2^\circ$  по долготе и  $1.5^\circ$  по широте, а не в самих городах. В период 1951–2014 гг. УПТ, оцененное по данным метеонаблюдений в Москве, снизилось на 18%, а УПТ, оцененное по данным INM-CM5 для центральной части Русской равнины, снизилось на 8%. Поэтому реальные изменения УПТ в городах могут существенно отличаться от оценок, сделанных с помощью INM-CM5, и, судя по периоду 1951–2014 гг., в большую сторону.

## ОБСУЖДЕНИЕ

В работах, посвященных влиянию изменения климата на энергопотребление зданий [18–23], применяются различные подходы для количественного описания взаимосвязи между климатическими факторами и потреблением тепла. В одних работах для этой цели используются имитационные модели теплового баланса зданий [21–23], в других регрессионные модели, основанные на статистических данных о потреблении энергии [18–20], но практически во всех случаях оценивается

ожидаемый, а не минимально необходимый, уровень энергопотребления.

Однако, реальный уровень энергопотребления не всегда соответствует ожидаемому. Так, например, усиление термической защиты зданий создает условия как для снижения энергопотребления, так и для повышения температуры внутри здания до более комфортного уровня. Поэтому усиление тепловой защиты зданий не гарантирует снижение реального уровня энергопотребления, так как эффект тепловой защиты может быть нивелирован повышением температуры внутри здания до более комфортного уровня [24].

Минимально необходимый уровень энергопотребления, в отличие от реального, определяется уровнем теплоснабжения и климатом. Удельный показатель расчетного расхода тепла на отопление варьирует в диапазоне  $0.9\text{--}4.4 \text{ Вт (м}^2 \text{ }^\circ\text{C)}^{-1}$  в зависимости от года постройки и этажности здания [25]. Соответственно, величина  $h$  варьирует в диапазоне  $0.6\text{--}3.1 \text{ кВтч (м}^2 \text{ }^\circ\text{C)}^{-1}$ . Выбранное значение  $h$  ( $1.8 \text{ кВтч (м}^2 \text{ }^\circ\text{C)}^{-1}$ ) дает оценку УПТ в Санкт-Петербурге ( $179 \text{ кВтч/м}^2$ ), мало отличающуюся от статистических данных ЕС [26] для Латвии ( $172 \text{ кВтч/м}^2$ ) и Эстонии ( $199 \text{ кВтч/м}^2$ ) за 2017 год.

Для того, чтобы выявить влияние изменений климата, значение  $h$  было зафиксировано. Вследствие чего полученные в данном исследовании оценки характеризуют только вклад климатических факторов в изменение УПТ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Снижение энергозатрат на отопление в центральной части Русской равнины к середине века, оцениваемое на основе данных численных экспериментов на INM-CM5, практически не отличается от аналогичных оценок, сделанных для Европы [12]. Из этого следует, что рассматриваемая проблема не является специфической для центральной части Русской равнины и затрагивает многие города Европы. Насколько данная проблема является критичной для конкретного региона или даже конкретного города, зависит от состояния энергосистем и городской инфраструктуры в целом. В Швейцарии [27], например, эта проблема трактуется двояко: с одной стороны, климатически обусловленное снижение энергопотребления позволяет снизить выбросы углекислого газа без дополнительных затрат, а с другой стороны, связано с необходимостью модифицировать существующие энергосистемы, причем в условиях неопределенности относительно “рабочего” сценария социально-экономического развития [28].

Предложенный в статье метод для оценки снижения энергозатрат на отопление по данным чис-

ленных экспериментов на моделях климатической системы позволяет оценить масштаб проблемы, возникающей в связи с необходимостью адаптации городов к изменению климата.

Работа выполнена под научным руководством А.С. Гинзбурга при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00114).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Heinimann H.R., Hatfield K.* Infrastructure resilience assessment, management and governance—state and perspectives // *Resilience and risk*. Springer, Dordrecht, 2017. P. 147–187.
2. *Volodin E., Gritsun A.* Simulation of observed climate changes in 1850–2014 with climate model INM-CM5 // *Earth System Dynamics*. 2018. V. 9. № 4. P. 1235–1242.
3. *Alexandrov G.G., Ginzburg A.S.* Anthropogenic impact of Moscow district heating system on urban environment // *Energy Procedia*. 2018. V. 149. P. 161–169.
4. *Ginzburg A.S., Reshetar O.A., Belova I.N.* Impact of climatic factors on energy consumption during the heating season // *Thermal Engineering*. 2016. V. 63. № 9. P. 621–627.
5. *Belova I.N., Ginzburg A.S., Krivenok L.A.* Heating seasons length and degree days trends in Russian cities during last half century // *Energy Procedia*. 2018. V. 149. P. 373–379.
6. Справочное пособие к СНиП 23-01-99 “Строительная климатология”. М: НИИСФ, 2006
7. *Александров Г.Г., Гинзбург А.С.* Климатически обусловленный минимум энергопотребления в жилом секторе городов // *Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования климат-2019*. 2019. Т. 26. С. 160.
8. ГОСТ 56778-2015 Системы передачи тепла для отопления помещений. Методика расчета энергопотребления и эффективности. Введ. 2016-07-01. 2016. <http://docs.cntd.ru/document/1200127459>
9. *Nicol J.F., Humphreys M.A.* Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings // *Energy and buildings*. 2002. V. 34. № 6. P. 563–572.
10. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Введ. 1996-09-01. 1996. <http://docs.cntd.ru/document/901704046>
11. ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. Введ. 2013-01-01. 2013. <http://docs.cntd.ru/document/gost-30494-2011>
12. *van Ruijven B.J., De Cian E., Wing I.S.* Amplification of future energy demand growth due to climate change // *Nature communications*. 2019. V. 10. № 1. P. 1–12.
13. *Gidden M. et al.* Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century // *Geoscientific model development discussions*. 2019. V. 12. № 4. P. 1443–1475.
14. *Balaji V. et al.* Requirements for a global data infrastructure in support of CMIP6 // *Geoscientific Model Development*. 2018. V. 11. № 9. P. 3659–3680.

15. *Eyring V. et al.* Overview of the Coupled Model Inter-comparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geoscientific Model Development*. 2016. V. 9. № 5. P. 1937–1958.
16. *Slivinski L.C. et al.* Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2019. V. 145. № 724. P. 2876–2908.
17. *Lawrimore J.H. et al.* An overview of the Global Historical Climatology Network monthly mean temperature data set, version 3 // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2011. V. 116. № D19.
18. *Huang J., Gurney K.R.* Impact of climate change on US building energy demand: sensitivity to spatiotemporal scales, balance point temperature, and population distribution // *Climatic change*. 2016. V. 137. № 1–2. P. 171–185.
19. *Hamlet A.F. et al.* Effects of projected climate change on energy supply and demand in the Pacific Northwest and Washington State // *Climatic Change*. 2010. V. 102. № 1–2. P. 103–128.
20. *Sathaye J.A. et al.* Estimating impacts of warming temperatures on California’s electricity system // *Global Environmental Change*. 2013. V. 23. № 2. P. 499–511.
21. *Xu P. et al.* Impacts of climate change on building heating and cooling energy patterns in California // *Energy*. 2012. V. 44. № 1. P. 792–804.
22. *Wang H., Chen Q.* Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States // *Energy and Buildings*. 2014. V. 82. P. 428–436.
23. *Dirks J.A. et al.* Impacts of climate change on energy consumption and peak demand in buildings: A detailed regional approach // *Energy*. 2015. V. 79. P. 20–32.
24. *Grealis E., Musch A.K., Rau H.* The Impact of German Energy Policy on Household Energy Use // *Energy Demand Challenges in Europe*. Palgrave Pivot, Cham. 2019. P. 21–33.
25. *Ливчак В.И.* Обоснование расчета удельных показателей расхода тепла на отопление разноэтажных жилых зданий // *АВОК*. 2005. № 2. [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=2782](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2782)
26. *Odysee-Mere.* Consumption of household per m<sup>2</sup> for space heating (at normal climate) <https://www.indicators.odyssee-mure.eu/online-indicators.html>
27. *Berger M., Worlitschek J.* The link between climate and thermal energy demand on national level: A case study on Switzerland // *Energy and Buildings*. 2019. V. 202. P. 109372. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109372>
28. *Hausfather Z., Peters G. P.* Emissions—the ‘business as usual’ story is misleading // *Nature*. 2020. № 577. P. 618–620.

## Climatically Driven Minimum of Energy Demand for Heating in Cities at the Center of the Euporian Part of Russia

G. G. Alexandrov\*

*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia*

*\*e-mail: gleb@ifaran.ru*

The minimum level of energy consumption in the cities of the Russian Plain is largely determined by climatic conditions because residential heating in winter is a vital necessity here. Therefore, the specific heat demand (SHD) – an estimate of the climate-related minimum energy requirement for heating one square meter of living space – is proposed for use as an economically relevant indicator of regional climate change. Calculations of the SHD based on the data of numerical experiments on INM-CM5.0 climate model indicate a possible strengthening of the downward trend in the SHD observed in the cities of the Russian Plain in the period 1950–2014. The proposed indicator allows us to estimate the scale of the problem arising from the need to adapt urban energy systems to reduce energy demands for heating based on the data from numerical experiments on climate system models.

**Keywords:** climate system models, regional climate change, global warming, energy consumption