

## ВЛИЯНИЕ СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ НА КОНТИНЕНТАЛЬНОСТЬ МОСКОВСКОГО КЛИМАТА

© 2019 г. Г. А. Александров, А. С. Гинзбург, Г. С. Голицын

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, Москва, Ж-17, Пыжевский пер., 3  
E-mail: g.alexandrov@ifaran.ru*

Поступила в редакцию 26.04.2019 г.

Принята к печати 29.05.2019 г.

Естественная изменчивость региональных климатических условий создает определенные сложности для выявления глобальных изменений климатической системы на локальном уровне. В каждом конкретном случае возникает вопрос о соотношении вклада антропогенного форсинга, вызванного повышением концентрации углекислого газа в атмосфере, и вклада естественной изменчивости атмосферной и океанической циркуляции. Цель настоящего исследования состоит в оценке вклада североатлантического колебания в снижение индекса континентальности московского климата. Полученные результаты показывают, что во второй половине XX в. значительная часть ослабления континентальности может быть отнесена на счет роста индекса североатлантического колебания, наблюдавшегося в этот период.

**Ключевые слова:** климат Москвы, континентальность климата, североатлантическое колебание.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002-351555532-38>

### ВВЕДЕНИЕ

Изменения континентальности климата в различных регионах мира в условиях глобального потепления являются важным фактором, существенно влияющим на погодные условия, в том числе экстремальные метеорологические явления, на сезонные характеристики энергоснабжения городской инфраструктуры и условия ведения сельского и лесного хозяйства.

Главной мерой континентальности климата служит годовая амплитуда приземной температуры воздуха, однако существуют и другие проявления континентальности климата, такие как годовой ход влажности воздуха, количества облачности и осадков, повторяемость циклонов и антициклонов, сезонные особенности загрязнения атмосферного воздуха.

Континентальность климата конкретного региона проявляется и в суточных амплитудах метеорологических характеристик, которые в данной работе не рассматриваются.

В густонаселенных районах мира, особенно в крупных городских агломерациях, изменения

континентальности климата могут существенно влиять на качество жизни людей и определять перераспределение энергопотребления городского хозяйства между отопительным периодом и периодом кондиционирования жилых, общественных и производственных помещений в теплое время года.

В предыдущих работах авторов [1, 2] нами было показано, что в период 1951–2000 гг. повышение среднегодовой температуры (СГТ) в Москве сопровождалось снижением индекса континентальности Горчинского (ИКГ). В этот же период наблюдался рост годового индекса североатлантического колебания (САК). Поэтому цель исследования, результаты которого излагаются в данной статье, состояла в том, чтобы определить вклад роста САК в снижение ИКГ.

Наблюдаемая динамика и определение причин современного ослабления континентальности приобретает особое значение в контексте прогнозирования сезонного хода энергопотребления в московской агломерации и в других больших урбанизированных территориях. В работах, выполненных

сотрудниками ИФА им. А.М. Обухова РАН и Национального исследовательского университета «МЭИ» в рамках проекта Российского научного фонда «Анализ влияния региональных изменений климата на энергопотребление городского хозяйства мегаполисов России», показано, что во второй половине XX в. заметно изменилось соотношение между потребностью в энергопотреблении на отопление помещений в холодный период года и на кондиционирование помещений в теплый период [3–6].

В последние десятилетия в Москве, например, продолжительность отопительного периода слабо меняется, а средняя температура воздуха повышается. В результате сумма градус-суток отопительного периода, характеризующая потребность в теплоснабжении городского хозяйства зимой, несколько уменьшается.

В летний период растет потребление электроэнергии на кондиционирование помещений, но этот эффект в Москве еще незначителен и пока отсутствуют надежные оценки его величины.

Понимание соотношения роли природных и антропогенных факторов изменения зимних и летних температурных режимов в московской агломерации, в том числе и за счет ослабления континентальности московского климата, очень важны для более обоснованного прогнозирования сезонных особенностей энергоснабжения городского хозяйства Москвы.

Исследование глобальной составляющей континентальности московского климата особенно важно для планирования энергопотребления не только российских, но других мегаполисов Северного полушария, поскольку как показано в [5] Москва является естественным тестовым полигоном для оценки последствий сильного потепления.

## ИНДЕКСЫ КONTИНЕНТАЛЬНОСТИ КЛИМАТА

Главной характеристикой континентальности климата того или иного региона является разность между среднемесячной температурой воздуха самого теплого месяца и среднемесячной температурой самого холодного месяца. Естественно, что амплитуда годового хода температуры воздуха зависит прежде всего от широты и удаленности региона от океана.

В конце XIX в. появились первые эмпирические формулы для количественной оценки

степени континентальности климата, наиболее известная из которых формула Ценкера, опубликованная в 1888 г. (см., например, [7]), до сих пор с некоторыми модификациями используется в публикациях о региональных особенностях климата различных территорий

$$K = \frac{6}{5} \left( \frac{A}{\phi} - 20 \right),$$

где  $K$  — индекс континентальности,  $A$  — амплитуда годового хода температуры воздуха в градусах,  $\phi$  — географическая широта.

В начале XX в. польским климатологом Владиславом Горчинским была предложена формула, основанная на учете особенностей морского и континентального климата [8]. Горчинский учел, что годовая амплитуда воздуха над океаном —  $A_0$  в области, наиболее удаленной от континентов (между 30-й и 60-й широтой южного полушария) линейно зависит от синуса широты  $A_0(\phi) = 12\sin\phi$ .

Он предложил считать климат Верхоянска стопроцентно континентальным, как климат области, наиболее удаленной от океанов при западной розе ветров. Если оценивать континентальность по разности амплитуд температуры воздуха в конкретном регионе —  $A$  и в условиях «эталонного» морского климата —  $A_0$  как

$$K = c \frac{(A - A_0)}{\sin\phi},$$

то для того, чтобы  $K$  было равно 100 для Верхоянска,  $c$  должно быть равно 1.7. Характерное значение  $A_0/\sin\phi$  по Горчинскому равно 20.4 и окончательный вид наиболее широко используемой в мировой научной литературе формулы для индекса континентальности Горчинского (ИКГ) имеет вид

$$K = \frac{1.7A}{\sin\phi} - 20.4.$$

Имеется целый набор других формул для расчета индекса континентальности, предложенных советскими и зарубежными учеными. Наряду с ИКГ широко используются индексы, предложенные Конрадом [9]

$$K = \frac{1.7A}{(\sin\phi + 10)} - 14$$

и Хромовым [10]

$$K = \frac{A - 5.4\sin\phi}{A}.$$

Формулы Горчинского и Хромова часто применяются для характеристики климатических

условий в различных регионах Евразии [см. 11–13 и др.]. В данной работе используется ИКГ как наиболее чувствительный к современным изменениям климата индекс континентальности.

### ОСЛАБЛЕНИЕ КОНТИНЕНТАЛЬНОСТИ КЛИМАТА

Снижение ИКГ при повышении среднегодовой температуры (СГТ) объясняется теми же причинами, что и сезонная асимметрия температурных трендов, которая проявляется в изменении амплитуды годового хода температуры воздуха (АГТ). На большей части суши наблюдается отрицательная корреляция между СГТ и АГТ, причем как в данных метеостанций [14], так и в результатах численных экспериментов на моделях климатической системы [15].

Снижение амплитуды годового хода температуры воздуха при повышении среднегодовой температуры под воздействием антропогенного форсинга частично может быть объяснено по аналогии со снижением суточной амплитуды температуры в условиях глобального потепления.

Суточная асимметрия глобального потепления привлекла заметное внимание климатологов в конце XX в. (см., например, [16]) и была подробно рассмотрена в [17]. В этой работе было показано, что одним из возможных объяснений асимметричной реакции температуры приземного воздуха на антропогенный радиационный форсинг может быть нелинейная зависимость теплового излучения поверхности и атмосферы Земли от температуры.

Тепловое излучение подстилающей поверхности  $T_s$ , практически равно излучению черного тела при этой температуре:  $B_s = \sigma T_s^4$ . При относительно малых изменениях температуры и, соответственно, теплового излучения подстилающей поверхности, изменение излучения черного тела пропорционально изменению температуры, т.е.  $\delta B_s = 4\sigma T_s^3 \delta T_s$ .

Радиационный форсинг влияет на радиационный баланс поверхности и тем самым на ее температуру. Чем ниже средняя температура, тем больше температурный отклик на одинаковый форсинг, и наоборот.

Аналогичный подход к описанию суточной асимметрии глобального потепления использован в [18]. В последние годы все большее

внимание многие исследователи обращают на рассмотрение структуры, причин и механизмов сезонности глобального потепления (см., например, [19]).

Механизмы сезонной асимметрии глобального потепления очевидно также могут быть связаны с различной эффективностью радиационного форсинга в теплое и холодное время года, но этот вопрос требует отдельного исследования.

Кроме того, на величину АГТ влияет циркуляция атмосферы: поскольку АГТ над океанами значительно ниже, чем над сушей, снижение АГТ над сушей нередко рассматривают как признак усиления процессов переноса тепла с океана на сушу [20, 21]. Одним из наиболее важных показателей variability крупномасштабной циркуляции атмосферы над Северной Атлантикой и Европой, оказывающей существенное влияние на климат Европы, является САК [22–24].

### ВЫЯВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ САК И ИКГ

Для выявления взаимосвязи между САК и ИКГ использовались данные о среднемесячной температуре воздуха на метеостанции ВВЦ в период 1951–2015 гг. и метеостанции ТСХА в период 1879–1950 гг. [25]. Данные за период 1821–1856 гг. и данные отрывочных наблюдений 1779–1792 гг., предоставляемые глобальной сетью исторической климатологии [26], не анализировались: ряд годовых значений САК [27] начинается с 1865 г., поэтому анализировались ряды наблюдений за период 1879–2015 гг. (код ВМО: 27612).

Временной ряд САК был преобразован во временной ряд 30-летнего скользящего среднего САК, САК<sub>30</sub>, (рис. 1), а временные ряды среднемесячной температуры воздуха — во временной ряд 30-летнего скользящего среднего среднемесячной температуры, исходя из которого были вычислены ряды среднегодовой температуры, СГТ<sub>30</sub>, (рис. 2) и индекс континентальности Горчинского, ИКГ<sub>30</sub>, (рис. 3).

Как видно из рис. 2 в 1879–2015 гг. происходило заметное изменение среднегодовой температуры воздуха в Москве: она росла со скоростью 0.2 °C в декаду (за десять лет). САК<sub>30</sub> сперва рос, потом снижался, и затем снова рос (рис. 1). ИКГ<sub>30</sub> снижался в периоды роста САК<sub>30</sub> и оставался относительно постоянным в пери-



Рис. 1. Изменения годового индекса североатлантического колебания (САК) в XX в.



Рис. 2. Изменения среднегодовой температуры воздуха в Москве в XX в.

од снижения  $САК_{30}$  (рис. 3, сплошная линия), из чего можно предположить, что снижение  $ИКГ_{30}$ , связанное с повышением  $СГТ_{30}$ , сдерживалось в середине века из-за снижения  $САК_{30}$ , а в конце века, наоборот, усиливалось из-за повышения  $САК_{30}$  — другими словами, что отклонения  $ИКГ_{30}$  от средней величины за период 1879–2015 гг.,  $ИКГ_{cp}$ , можно представить в виде линейной комбинации отклонений  $СГТ_{30}$  и  $САК_{30}$ :

$$ИКГ_{30} - ИКГ_{cp} = a(СГТ_{30} - СГТ_{cp}) + b(САК_{30} - САК_{cp}). \quad (1)$$

Коэффициенты  $a = -2.15$  и  $b = -2.73$  минимизируют сумму квадратов отклонений значений  $ИКГ_{cp} + a(СГТ_{30} - СГТ_{cp}) + b(САК_{30} - САК_{cp})$ , показанных на рис. 3 пунктиром, от значений  $ИКГ_{30}$ , показанных на рис. 3 сплошной линией. Значение коэффициента детерминации ( $R^2$ ), характеризующего точность приближения, для периода 1879–2015 гг. равно 0.72. Для периода 1951–2000 гг. точность полученного приближения существенно выше ( $R^2 = 0.89$ ; рис. 4).

Полученное приближение предполагает, что  $ИКГ_{30}$  снижается примерно на 2% при повышении  $СГТ$  на 1 °С. В предыдущих работах авторов, где влияние североатлантического колебания не учитывалось, повышение  $СГТ_{30}$  на 1 °С сопровождалось снижением  $ИКГ$  примерно на 4%. Отсюда можно сделать вывод о влиянии североатлантического колебания на континентальность московского климата: примерно половина изменения  $ИКГ_{30}$  в период 1951–2015 гг. может быть отнесена на счет изменений  $САК_{30}$ . Изменения  $ИКГ_{30}$  во второй половине прошлого века хорошо объясняются изменениями  $СГТ_{30}$  и  $САК_{30}$ , но для объяснения изменений

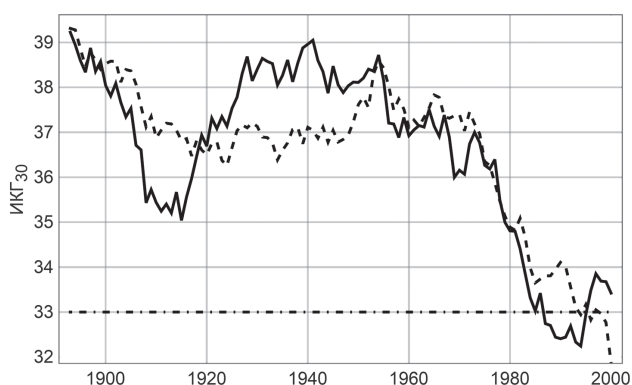


Рис. 3. Изменения индекса континентальности Горчинского, вычисленного по среднемесячной температуре воздуха в Москве (пунктиром показан график линейной зависимости  $ИКГ_{30}$  от  $СГТ_{30}$  и  $САК_{30}$ , определяемой уравнением (1)). Штрих-пунктиром показана граница между значениями  $ИКГ_{30}$ , соответствующими умеренно морскому климату, и значениями, соответствующими умеренно континентальному климату.

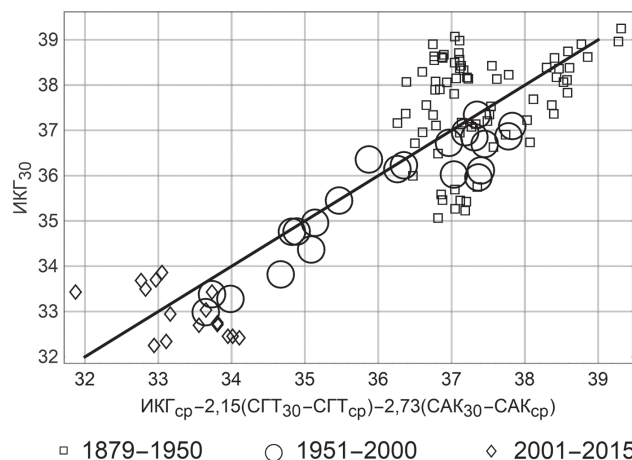


Рис. 4. Точность аппроксимации  $ИКГ_{30}$ , вычисленного по среднемесячной температуре воздуха в Москве, линейной зависимостью  $ИКГ_{30}$  от  $СГТ_{30}$  и  $САК_{30}$ , задаваемой уравнением (1).

ИКГ<sub>30</sub> в первой половине XX в. этих факторов недостаточно.

В начале прошлого века ИКГ<sub>30</sub> очень сильно понизился, а затем очень высоко поднялся (рис. 3, сплошная линия). Если принять во внимание, что в этот же период времени положительная корреляция между САК и температурой приземных воздушных масс в Арктике во время зимнего периода сменилась на отрицательную, а затем вернулась к прежним значениям [28], то можно сделать вывод, что на континентальность московского климата оказывают влияние не только те циркуляционные процессы, которые можно охарактеризовать с помощью индекса североатлантического колебания. Ситуация с континентальностью московского климата в начале XX в., а также в первые десятилетия XXI в. требует отдельного изучения.

Выявление роли циркуляционных процессов, которые нельзя охарактеризовать с помощью индекса североатлантического колебания, выходит за рамки данной статьи, но создает предпосылки для дальнейших исследований по диагностике изменений региональных климатических условий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Широко известно, что одной из наиболее общих характеристик региональных климатических условий является сезонный ход среднемесячной температуры воздуха (см., например, [29]). Локальный сезонный ход среднемесячной температуры воздуха представляет собой нелинейный отклик климатической системы в целом на сезонные изменения в пространственном распределении радиационного баланса. В результате АГТ существенно различается между точками наблюдений, расположенными на одной широте и, соответственно, получающими примерно одинаковое количество среднемесячной солнечной радиации.

На большей части суши наблюдается отрицательная корреляция между изменениями СГТ и АГТ. Снижение АГТ объясняют изменением радиационного баланса суши, связанного с повышением концентрации углекислого газа в атмосфере, и изменением циркуляции атмосферы. Однако исчерпывающего объяснения причин отрицательной корреляции между СГТ и АГТ в настоящее время нет. Результаты данного исследования в какой-то степени восполняют этот пробел, так как показывают, что в случае

отдельных районов Европейского континента отрицательная корреляция между СГТ и АГТ может быть отчасти объяснена усилением переноса тепла с Атлантического океана на сушу западными ветрами умеренного пояса, не связанным с радиационным форсингом, вызываемым повышением концентрации углекислого газа в атмосфере.

Поскольку города являются основными источниками антропогенных выбросов в атмосферу тепла и парниковых газов, то определение доли глобальных факторов в современном ослаблении континентальности климата в таких больших городских агломерациях как московская, имеет принципиальное значение для оценки тех колебаний потребления энергии городским хозяйством, которые не зависят непосредственно от жизнедеятельности города.

Москва как естественный тестовый полигон для оценки последствий сильного потепления дает возможность оценивать минимальные и максимальные потребности в теплоснабжении большого города с учетом современного ослабления континентальности климата.

**Источник финансирования.** Исследование изменений московского климата выполнено в рамках крупного проекта по проведению фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям, определяемым президиумом Российской академии наук, КП19-278 «Новые вызовы климатической системы Земли». Исследование влияния ослабления континентальности московского климата на изменение сезонного хода энергопотребления городского хозяйства выполнена при поддержке РНФ (проект № 16-17-00114-П).

Авторы также выражают глубокую признательность рецензенту, важные и конструктивные замечания которого позволили существенно улучшить текст статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Г.А., Гинзбург А.С., Голицын Г.С. Динамика индекса континентальности Горчинского при изменениях климата / В сб. Турбулентность, динамика атмосферы и климата. 2018. М.: Изд-во Физматкнига. С. 168–171.
2. Alexandrov G.A., Ginzburg A.S., Golitsyn G.S. The negative correlation between the changes in Moscow's continentality index and mean annual temperature // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. V. 231. № 1. С. 012004.

3. Гинзбург А.С., Решетарь О.А., Белова И.Н. Влияние климатических факторов на энергопотребление в отопительный сезон // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 20–27.
4. Клименко В.В., Гинзбург А.С., Демченко П.Ф., Терешин А.Г., Белова И.Н., Касилова Е.В. Влияние урбанизации и потепления климата на энергопотребление больших городов // ДАН. 2016. Т. 470. № 5. С. 519–524.
5. Клименко В.В., Терешин А.Г., Касилова Е.В. Москва: естественный тестовый полигон для оценки последствий сильного потепления // ДАН. 2017. Т. 477. № 1. С. 30–34.
6. 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. V. 149. 2018. P. 373–379.
7. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 568 с.
8. Gorczynski W.L. The calculation of the degree of continentality // Monthly Weather Review. 1922. V. 50. № 7. P. 369–370.
9. Conrad V. Usual formulas of continentality and their limits of validity // Trans. Am. Geophys. Union. 1946. V. 27. № 5. P. 663–664.
10. Хромов С.П. К вопросу о континентальности климата // Изв. Всесоюзного Географического общества. 1957. Т. 89. Вып. 3. С. 222–225.
11. Poltarauis B.V., Staviskiy D.B. The changing continentality of climate in central Russia // Soviet Geography. 1986. V. 27. № 1. P. 51–58.
12. Vilček J., Škvarenina J., Vido J., Nalevanková P., Kandrík R., Škvareninová J. Minimal change of thermal continentality in Slovakia within the period 1961–2013 // Earth Syst. Dynam. 2016. V. 7. P. 735–744.
13. Лапина С.Н. Характеристика континентальности климата Саратова и Санкт-Петербурга на фоне глобального потепления // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2017. Т. 17. Вып. 4. С. 219–221.
14. Eliseev A.V., Mokhov I.I. Amplitude-phase characteristics of the annual cycle of surface air temperature in the Northern Hemisphere // Adv. Atmos. Sci. 2003. V. 10. № 1. P. 1–16.
15. Елисеев А.В., Мохов И.И., Гусева М.С. Чувствительность амплитудно-фазовых характеристик годового хода приповерхностной температуры к изменению среднегодовой температуры: Сравнение данных реанализа и результатов расчетов с климатическими моделями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 3. С. 326–340.
16. Karl T.R., Kukla G., Razuvayev V.N. et al. Global warming: evidence for asymmetric diurnal temperature change // Geoph. Res. Letters. 1991. V. 18. № 12. P. 2253–2256.
17. Демченко П.Ф., Голицын Г.С., Гинзбург А.С., Вельтищев Н.Н. Оценка суточного цикла парникового эффекта CO<sub>2</sub> по одномерным моделям вертикальной структуры атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 5. С. 595–600.
18. Davy R., Esau I., Chernokulsky A., Outten S., Zilitinkevich S. Diurnal asymmetry to the observed global warming // International Journal of Climatology. 2017. V. 37. № 1. P. 79–93.
19. Nigam S., Thomas N.P., Ruiz-Barradas A., Weaver S.J. Striking seasonality in the secular warming of the northern continents: Structure and mechanisms // J. Climate. 2017. V. 30. № 16. P. 6521–6541.
20. Stine A.R., Huybers P. Changes in the Seasonal Cycle of Temperature and Atmospheric Circulation // J. Climate. 2012. V. 25. P. 7362–7380.
21. McKinnon K.A., Stine A.R., Huybers P. The spatial structure of the annual cycle in surface temperature: Amplitude, phase, and Lagrangian history // J. Climate. 2013. V. 26. № 20. P. 7852–62.
22. Semenov V.A., Latif M., Jungclaus J.H., Park W. Is the observed NAO variability during the instrumental record unusual? // Geoph. Res. Letters. 2008. V. 35. P. L11701.
23. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада ЛТД, 2013. 144 с.
24. Deser C., Hurrell J.W., Phillips A.S. The role of the North Atlantic Oscillation in European climate projections // Climate Dynamics. 2017. V. 49. P. 3141.
25. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швеиц Н.В. 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).
26. Lawrimore J.H., Menne M.J., Gleason B.E., Williams C.N., Wuertz D.B., Vose R.S., Rennie J. An overview of the Global Historical Climatology Network monthly mean temperature data set, version 3 // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. P. D19121.
27. Hurrell J. The Climate Data Guide: Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (station-based). USA. Boulder. 2018. URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>
28. Семенов В.А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // ДАН. 2008. Т. 418. № 1. С. 106–109.
29. Александров Г.А. К вопросу о выборе общего показателя для мониторинга эоклиматических изменений // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. XXVIII. № 1. С. 73–82.

## Influence of North Atlantic Oscillation on Moscow Climate Continentality

G. A. Alexandrov, A. S. Ginzburg, G. S. Golitsyn

*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS*

*Pyzhevski per, 3, Moscow, 119017, Russia*

*e-mail: g.alexandrov@ifaran.ru*

Received: 26.04.2019

Accepted: 29.05.2019

Natural variability of regional climatic conditions poses certain difficulties in detecting global climate change at a local scale. The question about the ratio between the contribution of human forcing, induced by the increase in atmospheric carbon dioxide concentration, and the contribution of natural variability in atmospheric and oceanic circulation arises in each particular case. The purpose of the study reported in this article was to evaluate the contribution of the North Atlantic Oscillation to decrease in Moscow's climate continentality during the period of 1951-2000. The results of this study show that a significant part of the decrease in continentality could be attributed to increase in the North Atlantic Oscillation index observed during this period.

**Keywords:** Moscow climate, climate continentality, North Atlantic Oscillation.