

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКОМ И СРЕДИЗЕМНОМОРСКОМ РЕГИОНАХ ПО ДАННЫМ РЕ-АНАЛИЗА ERA5

А.Б. Полонский, С.С. Бейцер

Институт природно-технических систем, РФ, Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: apolonsky5@mail.ru

По данным ре-анализа ERA-5 за 1979–2019 гг. анализируется сезонная и межгодовая изменчивость приземной/приводной температуры Атлантико-Европейского и Средиземноморского регионов, а также оцениваются тренды температуры за два периода (тридцатилетний и сорокаоднолетний). Подтверждена важная роль естественных изменений температуры на временных масштабах от меж годового до десятилетнего. Линейные тренды температуры, рассчитанные за последний климатический (тридцатилетний) период, отвечают за рост температуры над материковыми районами до 3°C за 30 лет. Вместе с тем, над значительной частью северо-восточной акватории Атлантики и прилегающих районов суши линейные тренды, оцененные за тридцатилетний период, незначимы. Здесь преобладают естественные квазипериодические компоненты изменчивости. С увеличением анализируемого периода области значимых трендов температуры расширяются.

Ключевые слова: тренды температуры, межгодовая и десятилетняя изменчивость температуры.

Поступила в редакцию: 02.03.2021. После доработки: 12.03.2021.

Введение. Проблема выделения межгодовых вариаций на фоне трендов приземной/приводной температуры воздуха в различных регионах земного шара как индикатора климатических изменений представляет собой особый интерес. Действительно, наблюдаемые изменения температуры воздуха вызваны как потеплением антропогенного происхождения, так и естественными вариациями климатической системы (в первую очередь за счет крупномасштабного взаимодействия океана с атмосферой). С одной стороны, скорость роста глобально усредненной приземной температуры антропогенного происхождения столетнего масштаба, составляющая порядка 1°C/100 лет, постепенно увеличивается [1, 2]. С другой стороны, во многих регионах земного шара на десятилетнем масштабе преобладают квазипериодические вариации температуры, которые могут существенно влиять на величину тренда при его оценке за временной интервал, не охватывающий целое количество основного периода колебания. К таким квазипериодическим сигналам в системе «океан – атмосфера»

относится, в частности Атлантическое мультideкадное колебание [3–9]. В связи с этим в настоящей работе анализируются данные одного из последних ре-анализов ERA-5 для Атлантико-Европейского и Средиземноморского регионов. Цель анализа – установить относительную роль трендовых и квазипериодических компонент изменчивости региональной температуры воздуха за последний климатический (тридцатилетний) период, наиболее полно обеспеченный данными наблюдений, за период 1979–2019 гг.

Материалы и методы их обработки. Информационная основа работы – данные ре-анализа ERA5. Это один из новейших климатических ре-анализов, который выполнен специалистами Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) с пространственным разрешением 0,25°x0,25° [10]. Ежечасные данные ре-анализа, характеризующие состояние атмосферы, поверхности суши и моря, представлены на сайте [11] вместе с оценками их неопределенности. Анализировались данные за 41 год, начиная с 1979 и по 2019 гг. Именно за этот период выполнен ре-анализ

ERA5. Отдельно рассматривались данные ре-анализа за последний климатический (тридцатилетний) период, начиная с 1990 г. С использованием данных ре-анализа вычислялись следующие характеристики:

- среднее значение температуры воздуха за 30 лет и 41 год для каждого месяца и в среднем за год для каждой точки исследуемой области;

- дисперсия среднемесячных температур, как характеристика усредненного сезонного цикла за эти два временных интервала;

- дисперсия среднегодовых величин температуры за 30 лет и 41 год, как характеристика межгодовых и междесятилетних термических вариаций в приземном/приводном слое атмосферы;

- отношение дисперсий среднегодовых величин температуры к среднемесячным, показывающая относительную величину межгодовых вариаций по сравнению с сезонными, для двух периодов (30 лет и 41 год);

- линейные тренды среднегодовых величин с оценкой доверительного интервала на 95% уровне значимости за 30-ти и 41-летний периоды;

- для каждого из субрегионов, имеющих свои особенности в характере межгодовой, междесятилетней изменчивости и трендов анализировался временной ход приземной/приводной температуры.

Более подробно процедура расчета описана в [12].

Результаты и их анализ. Пространственное распределение величины дисперсий приземной/приводной температуры различных временных масштабов и их соотношение, приведенные на рис. 1–3, позволяют сделать следующие выводы.

1. В полном соответствии с общепринятыми представлениями [13–15] амплитуда сезонных вариаций температуры воздуха в целом увеличивается при удалении от Атлантического океана и его окраинных морей. Максимальная амплитуда климатических внутригодовых изменений приземной температуры отмечается в крайне восточных материковых частях анализируемого региона. В области с центром, расположенном на 50° с.ш. и 45° в.д., ее величина достигает около 8,5°C. Над Атлантикой и Средиземным морем амплитуда усредненного сезонного цикла уменьшается в несколько раз по сравнению максимальными амплитудами. Минимальные величины этой характеристики отмечаются в северо-восточном секторе Атлантики (к северо-западу от Великобритании), где амплитуда усредненного сезонного хода приводной температуры воздуха уменьшается по сравнению с приведенным выше значением приблизительно в 4 раза (напомним, что на рис. 1, 2 приведены дисперсии температуры и для расчета амплитуды термических вариаций необходимо разделить эти величины на 2 и затем извлечь квадратный корень).

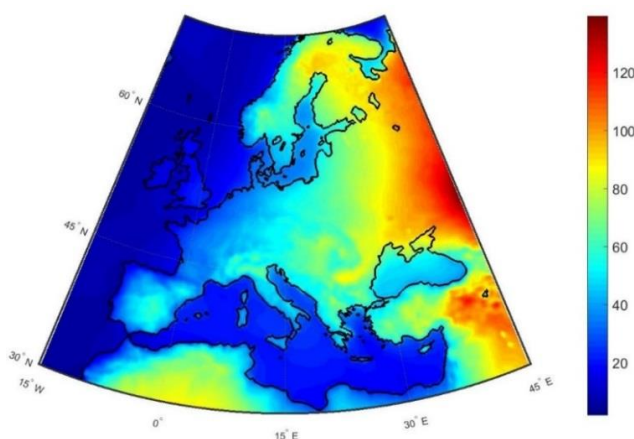


Рис. 1. Дисперсия среднемесячной (за последние 30 лет) температуры, характеризующая усредненный сезонный цикл ($\sigma_{\text{сез}}^2$)

Fig. 1. The variance of the average (for 30 yrs period) monthly surface temperature due to seasonal cycle ($\sigma_{\text{seasonal}}^2$)

2. Максимальные амплитуды межгодовых-междесятилетних вариаций среднегодовой температуры, рассчитанные по тридцатилетним рядам, отмечаются над материковыми районами и в Баренцевом море. Однако эти районы не совпадают с областями максимальных амплитуд сезонных вариаций приземной температуры. Локальные максимумы дисперсии межгодовых вариаций температуры отмечаются в районе Малой Азии, над Скандинавией и в Баренцевом море. После удаления линейного тренда величина дисперсии меж-

годовых флюктуаций, естественно, уменьшается, но пространственная структура поля мало меняется (рис. 2). Аналогичное пространственное распределение дисперсии межгодовых флюктуаций температуры получено и по данным реанализа за 41 год (рисунок не приведен). Это свидетельствует о важнейшей роли межгодовых и междесятилетних термических изменений естественного происхождения в формировании суммарной изменчивости поля температуры на масштабах порядка 30–40 лет.

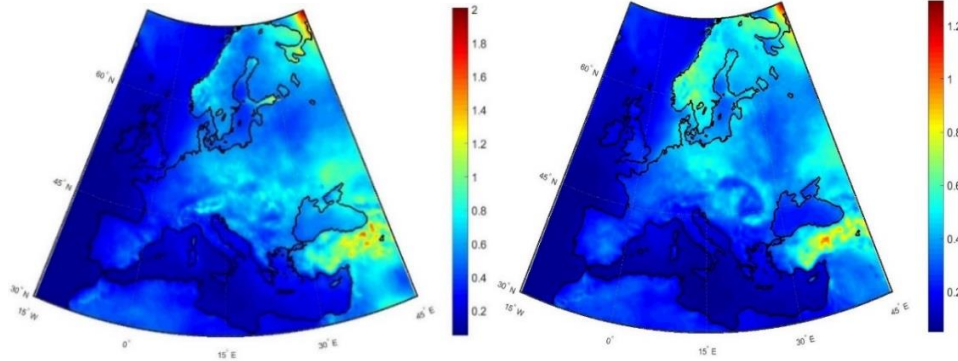


Рис. 2. Дисперсия среднегодовой температуры за последние 30 лет без фильтрации (слева) и после удаления линейного тренда (справа)

Fig. 2. Interannual variance of the yearly surface temperature with (left panel) and without (right panel) linear trend

3. Отношение дисперсий межгодовых вариаций среднегодовых температур к дисперсии, характеризующей амплитуду сезонной изменчивости, на большей части анализируемого региона изменяется в пределах 0,01-0,02 (рис. 3). Исключение составляют акватории северо-восточной Атлантики, Норвежского и Баренцева морей, а также окрестность Канарского апвеллинга, где это отношение достигает или превышает 0,05. Таким образом, максимальный вклад межгодовой и более низкочастотной изменчивости температуры в ее суммарную изменчивость наблюдается над океаническими и морскими акваториями, характеризующимися значительными адвективными переносами тепла в верхнем слое, что подтверждает ранее опубликованные результаты (например, [9]). Здесь амплитуда межгодовых и более низкочастотных вариаций температуры достигает как минимум 70% от амплитуды усредненного сезонного цикла.

4. Линейный тренд среднегодовой температуры, оцененный за тридцатилетний период и достигающий (или превышающий) 1°C за 10 лет, отмечается в Во-

сточной Европе, Альпийском и Черноморском регионах, включая Малую Азию, а также в Белом и Баренцевым морях. В северо-восточной части Атлантики, значительной части прилегающих к ней материковых районов и над большей частью акватории Балтийского моря линейный тренд приземной/приводной температуры незначим (на уровне 95% доверительного интервала, рис. 4). Именно в этих регионах суммарная межгодовая-междесятилетняя изменчивость температуры на 80–90% определяется естественными квазипериодическими вариациями, а линейный тренд отвечает за менее, чем 10–20% суммарной низкочастотной изменчивости (рис. 5). При увеличении рассматриваемого периода до 41 года область незначимых трендов существенно уменьшается, а роль трендовой компоненты изменчивости температуры в целом возрастает (рисунок не приведен). Необходимо отметить наличие областей отрицательных (хотя и незначимых) трендов приводной температуры в районе прибрежных апвеллингов (Канарского и Португальского).

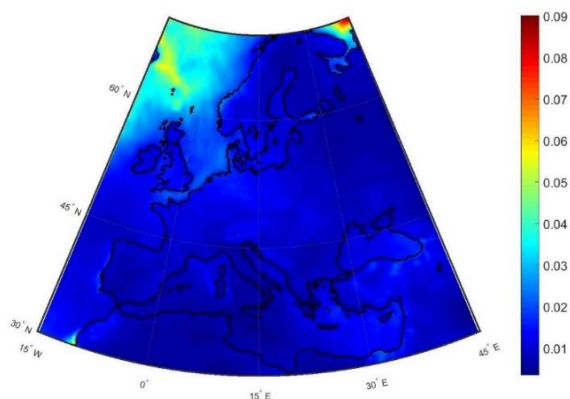


Рис. 3. Отношение дисперсий межгодовых вариаций среднегодовых температур (без фильтрации линейного тренда) к дисперсии, характеризующей амплитуду сезонной изменчивости
Fig. 3. Ratio of the interannual variance of the surface temperature (with the linear trend) to the seasonal one

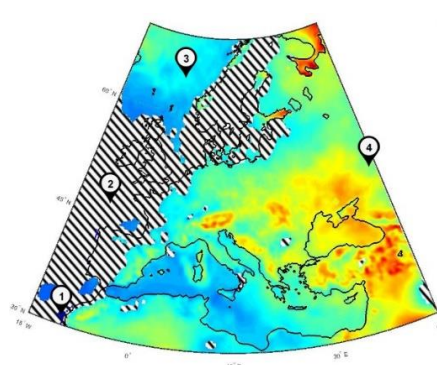


Рис. 4. Перепад приземной температуры за 30 лет, обусловленный линейным трендом. Цифрами показаны точки, для которых на рис. 6 приведен временной ход температуры. Заштрихованы области незначимых (на 95%-ом уровне) трендов

Fig. 4. Temperature change for 30 yrs due to the linear trend. The fingers show the points for those the time series of temperature are plotted at fig.6. Shaded area show the insignificant (at 95% confident level) trends

5. Временные ряды, приведенные на рис. 6, достаточно наглядно демонстрируют приведенные выше факты для нескольких субрегионов. Во-первых, на них хорошо видна тенденция увеличения относительного вклада межгодовых-междесятилетних вариаций температуры в ее суммарную низкочастотную изменчивость и уменьшение величины тренда над океаническими акваториями (по сравнению с материковыми участками рассматриваемого региона). Во-вторых,

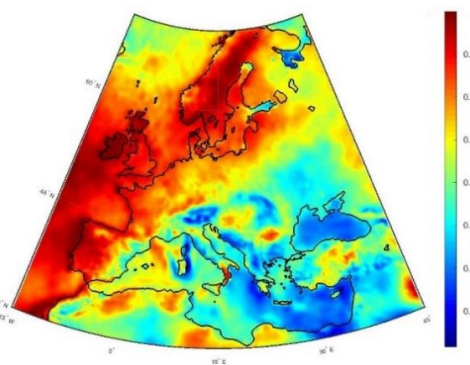


Рис. 5. Отношение дисперсии межгодовых флюктуаций среднегодовых температур после удаления линейного тренда к суммарной межгодовой дисперсии, рассчитанных за 30 лет $(\sigma^2_{\text{МГ-ТР}})/(\sigma^2_{\text{МГ+ТР}})$

Fig. 5. Ratio of the interannual variance of the average annual temperature after linear trend removing to the total variance assessed for the 30 yrs $(\sigma^2_{\text{interan-trend}})/(\sigma^2_{\text{interan+trend}})$

отмечается выраженное долгопериодное понижение приводной температуры в области Канарского апвеллинга (хотя оно формально и незначимо на 95%-ом уровне). Последний факт еще раз подтверждает справедливость гипотезы А. Бакуна [16] об интенсификации восточных прибрежных апвеллинговых систем в современную климатическую эпоху. Для области Канарского апвеллинга эта гипотеза была подтверждена анализом спутниковых данных в работе [17].

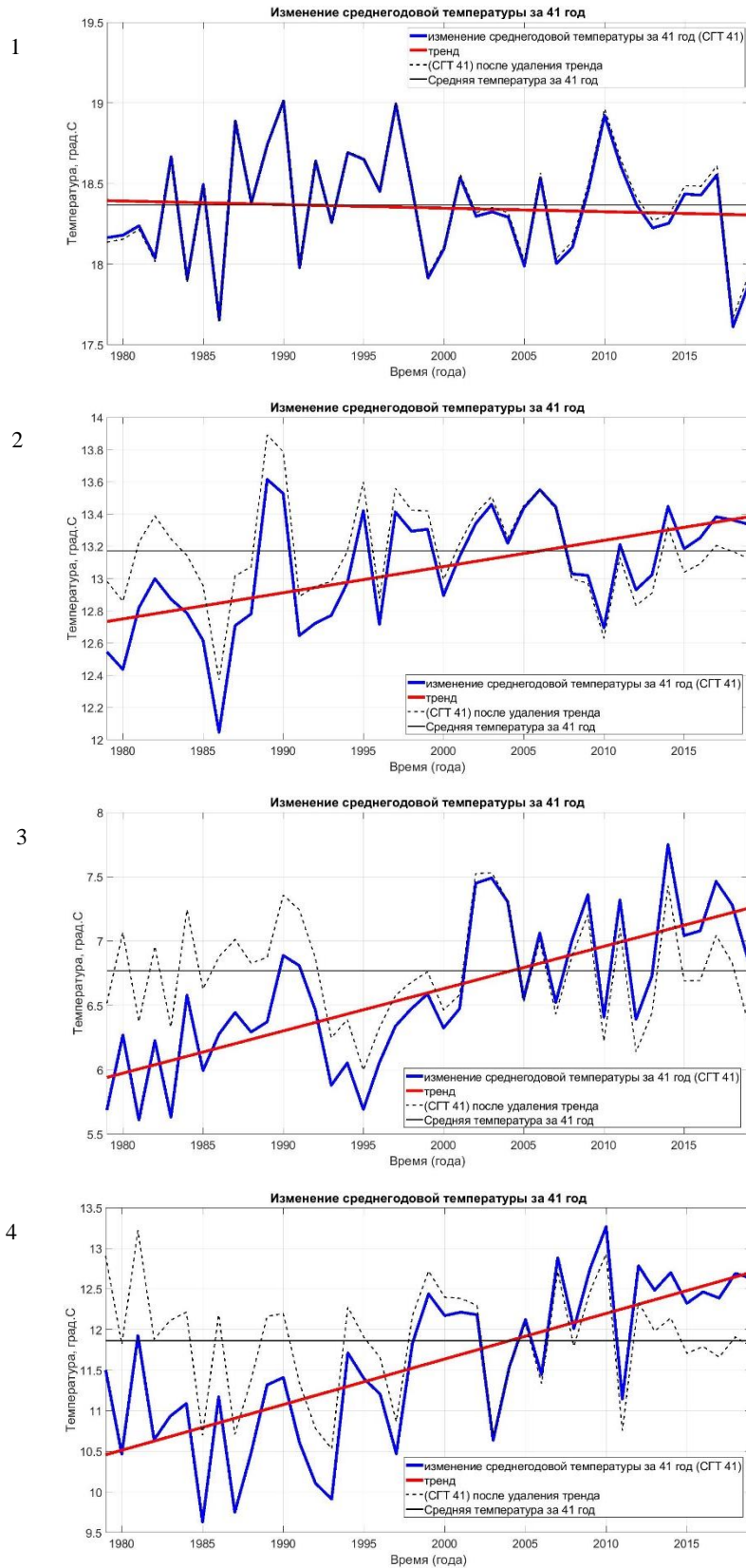


Рис. 6. Временной ход среднегодовой приземной/приводной температуры воздуха в четырех точках, отмеченных на рис. 4 (масштаб по оси ординат неодинаков в разных точках)
Fig. 6. Time series of the annual surface temperature in the four points shown at fig. 4 (the scale on the ordinate axis is not the same at different points)

Заключение. Приведенные результаты анализа изменчивости приземной/приводной температуры воздуха Атлантико-Европейского и Средиземноморского регионов в последние ~30–40 лет подтверждают важнейшую роль естественных изменений температуры на временных масштабах от межгодового до десятилетнего. Линейные тренды температуры, рассчитанные за последний тридцатилетний климатический период, отвечают за рост температуры над материковыми районами региона до 3°C за 30 лет. Вместе с тем, над значительной частью северо-восточной акватории Атлантики и прилегающих районов суши линейные тренды, оцененные за тридцатилетний период, незначимы. Здесь преобладают естественные квазипериодические компоненты изменчивости. С увеличением анализируемого периода области значимых трендов температуры расширяются. Причем, в области Канарского и Португальского апвеллингов наблюдается понижение приводной температуры, что подтверждает справедливость гипотезы А. Бакуна [16] об интенсификации восточных прибрежных апвеллинговых систем в современную климатическую эпоху.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I To the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* // S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Ed. Cambridge, Cambridge University Press. 2007. 996 p.
2. *IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* // [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC. Geneva, Switzerland. 151 p.
3. *Knight J., Allan R., Folland C., et al.* A signature of Persistent Natural Thermohaline Circulation Cycles in Observed Climate // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32. L20708.
4. *Kushnir Y.* Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions // *J. of Climate*. 1994. Vol. 7. No. 1. P. 141–157.
5. *Schlesinger M. E., Ramankutty N.* An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // *Nature*. 1994. Vol. 367. P. 723–726.
6. *Ljungqvist F.C.* A New Reconstruction of Temperature Variability in the Extra-Tropical Northern Hemisphere During the Last Two Millennia // *Geogr. Ann.* 2010. Vol. 92. P. 339–351.
7. *Семенов В.А., Мохов И.И., Полонский А.Б.* Моделирование влияния естественной долгопериодной изменчивости в Северной Атлантике на формирование аномалий климата в Северном полушарии // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 4. С. 14–27.
8. *Полонский А.Б.* Атлантическая мультидекадная осцилляция и ее проявления в Атлантико-Европейском регионе // *Морской гидрофизический журнал*. 2008. № 4. С. 69–79.
9. *Polonsky A.* *The Ocean's Role in Climate Change* / Cambridge Scholars Publishing. Newcastle-Upon-Tyne, UK. 2019. 294 p.
10. Электронный ресурс:
<https://reanalyses.org/atmosphere> (дата обращения: 02.02.2021).
11. Электронный ресурс:
<https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis> (дата обращения: 02.02.2021).
12. *Бейцлер С.С., Полонский А.Б.* Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2021612094. Мониторинг изменения приземной температуры воздуха. Дата регистрации: 11.02.2021.
13. *Koltermann, K. P., Gouretski, V., Jancke, K.* *Hydrographic Atlas of the World Ocean Circulation Experiment (WOCE) Volume 3: Atlantic Ocean* // Scripps Institution of Oceanography. US. 2011.
14. Электронный ресурс:
<https://Climate-Data.org> (дата обращения: 02.02.2021).
15. *WMO Region VI (Europe, Continent only): Highest Temperature* // *World Meteorological Organization*. 2020.
16. *Bakun A.* Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling // *Science*. 1990. Vol. 247. P. 198–201. DOI:10.1126/science.247.4939.198
17. *Полонский А.Б., Серебренников А.Н.* Многолетние тенденции в изменении температуры поверхности океана в зоне Канарского апвеллинга и их причины // *Исследования Земли из космоса*. 2018. № 3. С. 93–100. DOI:10.7868/S0205961418030077

**IDENTIFICATION OF THE SURFACE TEMPERATURE CHANGE
IN THE ATLANTIC-EUROPEAN AND MEDITERRANEAN REGIONS
USING ERA5 RE-ANALYSIS**

A.B. Polonsky, S.S. Beytser

Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin, St., 28

Using re-analysis ERA-5 for 1979–2019's, the seasonal and interannual variability of the surface temperature in the Atlantic-European and Mediterranean regions is assessed as well as the trends for the periods of 30 and 41 yrs. The important role of the natural temperature variability on the time scale from interannual to interdecadal is confirmed. The linear temperature trends assessed for the recent 30 yrs period account for the temperature rise up to 3°C per 30 yrs. At the same time on the majority of the N-E Atlantic and coincident continental regions, the linear 30 yrs trends are insignificant. The natural quasi-periodical variability prevails here. The areas of the significant trends spread when the analyzed time interval increases.

Keywords: temperature trends, interannual and interdecadal variability.

REFERENCES

1. IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I To the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Ed.* Cambridge. Cambridge University Press. 2007. 996 p.
2. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, *R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)*. IPCC. Geneva. Switzerland. 151 p.
3. Knight J., Allan R., Folland C., et al. A signature of Persistent Natural Thermohaline Circulation Cycles in Observed Climate. *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32. L20708.
4. Kushnir Y. Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions. *J. of Climate*. 1994. Vol. 7. No. 1. pp. 141–157.
5. Schlesinger M. E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. *Nature*. 1994. Vol. 367. pp. 723–726.
6. Ljungqvist F.C. A New Reconstruction of Temperature Variability in the Extra-Tropical Northern Hemisphere During the Last Two Millennia. *Geogr. Ann.* 2010. Vol. 92. pp. 339–351.
7. Semenov V.A., Mohov I.I., Polonskij A.B. Modelirovanie vlijanija estestvennoj dolgoperiodnoj izmenchivosti v Severnoj Atlantike na formirovanie anomalij klimata v Severnom polusharii. *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal*. 2014. No 4. pp. 14–27.
8. Polonskij A.B. Atlanticheskaja multidekadnaja oscilljacija i ee projavlenija v Atlantiko-Evropejskom regione. *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal*. 2008. No 4. pp. 69–79.
9. Polonsky A. The Ocean's Role in Climate Change / Cambridge Scholars Publishing. Newcastle-Upon-Tyne, UK. 2019. 294 p.
10. *Jelektronnyj resurs*: <https://reanalyses.org/atmosphere> (data obrashhenija: 02.02.2021).
11. *Jelektronnyj resurs*: <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis> (data obrashhenija: 02.02.2021).
12. Bejcer S.S., Polonskij A.B. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy na JeVM № 2021612094. Monitoring izmenenija prizemnoj temperatury vozduha. Data registracii: 11.02.2021.
13. Koltermann, K. P., Gouretski, V., Jancke, K. Hydrographic Atlas of the World Ocean Circulation Experiment (WOCE) Vol. 3: Atlantic Ocean. *Scripps Institution of Oceanography*. US. 2011.
14. *Jelektronnyj resurs*: <https://Climate-Data.org> (data obrashhenija: 02.02.2021).
15. WMO Region VI (Europe, Continent only): Highest Temperature. World Meteorological Organization. 2020.
16. Bakun A. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science*. 1990. Vol. 247. pp. 198–201. DOI:10.1126/science.247.4939.198.
17. Polonskij A.B., Serebrennikov A.N. Mnogoletnie tendencii v izmenenii temperatury poverhnosti okeana v zone Kanarskogo apvellinga i ih prichiny. *Issledovanija Zemli iz kosmosa*. 2018. No 3. pp. 93–100. DOI:10.7868/S0205961418030077.