



# Изменения приземной температуры воздуха в континентальной части арктического региона (Архангельская обл., респ. Коми, Ненецкий АО) – анализ и выбор модели прогноза

Максимова О.В., Гинзбург В.А.

ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля»

## Введение

Согласно расчетным оценкам, проведенным специалистами Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), наравне с естественными колебаниями климатической системы значительный вклад в изменение климата вносит деятельность человека, которая влечет потепление и соответствующие возможные негативные последствия [1]. Математическое моделирование и исследование динамики изменения климата может позволить провести оценку прогноза изменений одного или нескольких климатических параметров для анализа ситуации в целом. При прогнозе региональных изменений климата на территории Российской Федерации возникает много сложных моментов в использовании результатов математического моделирования из-за сильного влияния естественной климатической изменчивости помимо антропогенного воздействия [2]. Важно, чтобы соответствие модельных данных и данных реанализа наблюдалось на региональном уровне, если модель правильно описывает все процессы в климатической системе. В статье взят один из наиболее важных показателей – приземная температура воздуха – в арктическом регионе. Исследования, проводимые последние десятилетия в российской его части, являются очень важными, так как климатические изменения в ней вызывают изменения на огромной приграничной территории. Социальные последствия климатических изменений в Арктике, в том числе для здоровья населения, наиболее сильно ощутимы. Прогнозные модели различных климатических центров стран могут давать расхождение результаты по некоторым климатическим параметрам в этом регионе в зимний период [3]. Так, по средней приземной температуре в северных широтах некоторые модели дают расхождения в 5–6°C. Поэтому для оценки будущих изменений климата и его чувствительности при внешних изменениях окружающей среды важной задачей становится определение того, правильно ли воспроизводит климат та или иная модель.

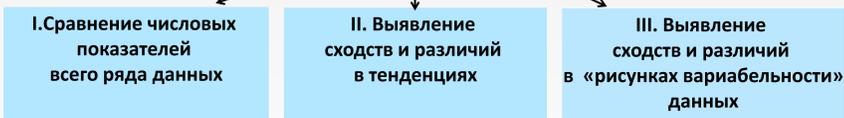
### Литература:

- IPCC, 2013-2014. Fifth Assessment Report, Climate Change 2013-2014, vol. 1-3. www.ipcc.ch.
- Бардин М.Ю. 2011. Сценарные прогнозы изменения температуры воздуха для регионов Российской Федерации до 2030 г. с использованием эмпирических статистических моделей климата // Метеорология и гидрология, № 4, с. 5-20.
- Деминков В.П., Лысков В.Н., Володин Е.М., Галин В.Я., Глазнов А.В., Гришин А.С., Дианский Н.А., Толстых М.А., Чавро А.И. 2005. Моделирование климата и его изменений. – Сб. «Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования», Т.2. М., Наука.

## Методология

В настоящем исследовании разработаны подходы для проведения сравнительного анализа данных глобальных климатических моделей различных стран в рамках проекта взаимного сравнения моделей CMIP5: INMCM4, HadGEM2-ES, BNU-ESM, NorESM1-M, MPI-ESM-LR, IPSL-CM5A-MR, CMCC.CMS. Сравнение проводилось с моделью реанализа ERA5 по многолетней среднемесячной температуре воздуха на уровне 2 м. Для сравнения была взята часть территории арктического региона (Архангельская область, Ненецкий АО и республика Коми) и выбран период с 1979 по 2005 гг., так как для этого периода имеются сопоставимые ряды данных реанализа и модельных экспериментов.

### Три подхода сравнения



Результаты, полученные на примере анализа по территории арктического региона, могут представлять существенный интерес при анализе глобальных климатических моделей для различных регионов и позволить исследователю расставить приоритеты важности предложенных в работе показателей в выборе наилучшей модели в зависимости от поставленной дальнейшей задачи исследования.

Для анализа использованы методы корреляционно-регрессионного анализа временных рядов и статистического оценивания, реализованные в программах Statistica 15 и Excel [4]. Также подобраны наиболее показательные статистические инструменты, с помощью которых возможно выполнение поставленной задачи.

### Литература:

- Закс Л. 1986. Статистическое оценивание. – М., Статистика, 360 с. <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/> (Дата обращения 15.06.2020)
- <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip5-daily-single-levels?tab=overview> (Дата обращения 15.06.2020)

## Результаты

### I. Сравнение числовых показателей всего ряда данных

Изменение среднемесячной приземной температуры воздуха служит одним из самых заметных индикаторов потепления. В работе помимо среднемесячных многолетних температур рассчитаны среднесезонные многолетние температуры зимнего периода, который в арктической зоне в среднем длится с ноября по февраль, и летнего, представленного месяцами июль и август. (табл. 1)

Таблица 1. Значения среднемесячных, среднесезонных и среднегодовых многолетних температур (°C) для прогнозных моделей проекта CMIP5 и модели реанализа ERA5 в континентальной части арктического региона (1979-2005 гг.) (наилучшие приближения к модели реанализа по убыванию их абсолютных значений отмечены зеленым, желтым и красным цветом)

№ месяца	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Средне-годовая	Средне-сезонная (зима)	Средне-сезонная (лето)
ERA5	-13,4	-16,4	-14,4	-8,2	-2,9	4,2	11,3	14,8	11,5	6,5	-0,3	-8,8	-1,3	-13,3	13,1
INMCM4	-18,2	-21,9	-22,1	-14,9	-6,2	4,5	12,1	12,7	9,3	4,9	-2,7	-10,7	-4,4	-18,2	11,0
BNU-ESM	-23,4	-27,6	-23,4	-16,3	-9,0	-1,5	6,1	9,9	7,6	3,3	-4,9	-13,6	-7,7	-22,0	8,8
HadGEM2-ES	-17,3	-19,5	-17,3	-9,9	-3,7	4,8	10,9	13,8	11,3	6,1	-0,3	-10,0	-2,6	-16,0	12,5
IPSL-CM5A-MR	-17,0	-19,5	-18,9	-10,7	-3,4	6,5	13,3	14,6	11,7	6,0	-3,1	-12,3	-2,7	-17,0	13,1
MPI-ESM-LR	-15,9	-19,2	-17,4	-11,9	-4,5	2,6	9,1	12,8	9,9	5,1	-2,1	-11,2	-3,6	-15,9	11,4
CMCC.CMS	-20,3	-23,1	-22,4	-15,2	-6,9	2,1	9,2	10,6	8,4	3,0	-5,4	-14,5	-6,2	-20,1	9,5
NorESM1-M	-18,8	-20,2	-16,2	-10,6	-2,7	3,8	8,8	12,4	10,9	4,8	-1,8	-10,8	-3,4	-16,5	11,7

Для модели BNU-ESM зафиксирован абсолютный максимум отклонения в 10°C относительно модели ERA5 для среднемесячных многолетних температур декабря (табл.1). С наибольшим числом лучших приближений выделяются модели HadGEM2-ES и IPSL-CM5A-MR.

Для оценки близости вариации сглаженных данных (методом скользящей средней с периодом 10 лет) сформирована новая величина, которая производит оценку поточечных парных отклонений между данными модели прогноза и модели реанализа (табл. 2):

$$SKO_{связи, k} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^k - y_i^{0k})^2}{n}}$$

$y_i^k$  –  $i$ -е значение сглаженных данных  $k$ -й прогнозной модели,  
 $y_i^{0k}$  –  $i$ -е значение сглаженных данных модели реанализа,  
 $n$  – объем данных.

Таблица 2. Значения SKO<sub>связи</sub> (°C) между прогнозными моделями проекта CMIP5 и моделью реанализа ERA5 для сглаженных данных приземных температур в континентальной части арктического региона (1979-2005 гг.) (наилучшие приближения к модели реанализа по убыванию их абсолютных значений отмечены зеленым, желтым и красным цветом)

№ месяца	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	По всему массиву	Средне-сезонная (зима)	Средне-сезонная (лето)
INMCM4	4,4	5,9	8,0	7,7	3,4	0,6	0,7	2,3	2,1	1,6	2,4	1,7	3,1	4,8	2,2
BNU-ESM	9,9	11,0	8,8	8,4	5,9	5,4	5,3	4,7	3,8	3,0	4,7	3,6	6,1	8,2	4,3
HadGEM2-ES	3,4	2,6	3,4	2,4	1,3	0,8	0,9	1,0	0,5	0,6	1,0	1,2	1,2	2,3	0,6
IPSL-CM5A-MR	3,6	3,3	4,8	3,5	1,2	2,3	1,6	0,4	0,7	0,4	2,5	3,2	1,5	3,6	0,4
MPI-ESM-LR	1,8	2,5	3,3	4,3	2,4	1,5	2,9	2,0	1,4	1,1	1,6	2,1	2,1	2,2	1,7
CMCC.CMS	6,4	7,0	8,5	8,1	4,6	2,1	2,6	3,8	2,7	3,3	5,2	4,8	4,8	6,6	3,3
NorESM1-M	6,1	4,3	2,4	2,8	0,9	0,5	2,7	2,4	0,5	1,7	1,5	1,5	2,1	3,4	1,4

Наихудшее сближение с большими значениями SKO<sub>связи</sub> наблюдается у моделей в зимние месяцы, достигающее, к примеру, для января в модели BNU-ESM отклонения в 11°C (табл. 2). Для этого периода наилучшее сближение дает группа моделей: HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR и MPI-ESM-LR; по всему массиву сглаженных данных группа: HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR, MPI-ESM-LR и NorESM1-M. Наихудшее сближение как по общему массиву, так и по двум выделенным сезонам, дает модель BNU-ESM.

### II. Выявление сходств и различий в тенденциях

Расчитанные в табл. 1 и 2 числовые показатели не учитывают анализ схожести динамики рядов данных. Наглядной характеристикой динамики временных рядов служит наличие тренда. В случае, когда модели дают хорошие или схожие сближения по числовым показателям к модели ERA5, построенные тренды могут отличаться не только расположением, но и знаком угла наклона, что снижает воспроизводимость модели и ставит под сомнение ее прогнозные свойства (рис. 1).

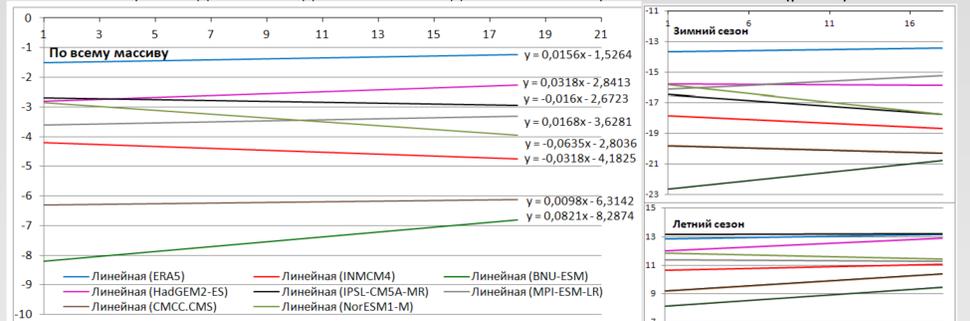


Рисунок 1. Линейные тренды по сглаженным данным среднемесячных температур для климатических моделей и модели реанализа ERA5 для всего массива зимнего и летнего сезонов

Сравнение трендов по расположению выявило группу близких к ERA5 моделей: HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR, MPI-ESM-LR и NorESM1-M. Все модельные тренды расположены ниже тренда для сглаженных данных ERA5. Такое снижение обусловлено, в первую очередь, низкими прогнозными свойствами моделей в продолжительный для арктической зоны зимний период (рис. 1). Для летнего периода наилучшее сближение к ERA5 и по наклону тренда и по его расположению дает модель IPSL-CM5A-MR, а для зимнего сезона – модели HadGEM2-ES и MPI-ESM-LR. Среди трендов прогнозных моделей зимнего сезона сложно определить наилучший. В таком случае наиболее детальную информацию о близости данных дают графики скользящих средних: в летний сезон на протяжении всего периода наиболее близкой является модель IPSL-CM5A-MR, а в зимний – MPI-ESM-LR, для всего периода – HadGEM2-ES.

### III. Выявление сходств и различий в «рисунках вариальности» данных

При идентичных линейных трендах прогнозных моделей может отличаться вариальность данных ряда, так как вывод уравнения тренда не учитывает ни амплитудные характеристики ряда, ни порядок следования его рисунков вариальности. Также сравнение порядка следования рисунков вариальности не дают и числовые характеристики, рассчитанные по всему массиву данных. Первоначально произведено сравнение вариации в целом при помощи диаграммы «box-and-whiskers» (ящик с усами), которая служит наглядным инструментом визуализации и дополняет рассчитанную ранее числовую характеристику SKO<sub>связи</sub>. Прогнозная модель BNU-ESM выделяется из общей группы моделей в первую очередь по низкому расположению «ящика», модель NorESM1-M дает расположение ящиков ближе к нулю, но имеет самые большие размеры ящика для всего массива, что свидетельствует о широком диапазоне разброса данных относительно ERA5 (рис. 2). Рис. 2 фиксирует, что это происходит по причине низких прогнозных качеств модели в зимний период. Наиболее близкой по вариальности сглаженных данных всего массива и зимнего сезона является группа моделей HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR и MPI-ESM-LR, по летнему – HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR.

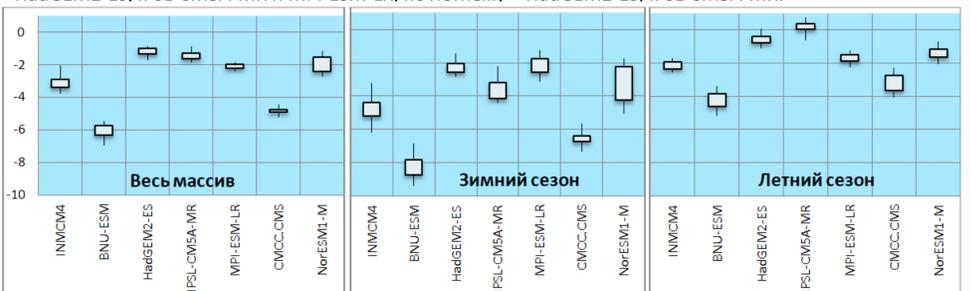


Рисунок 2. Диаграммы «box-and-whiskers» для разностей между модельными сглаженными данными средних приземных температур и ERA5 для всего периода, зимнего (ноябрь-февраль) и летнего (июль-август) сезонов

Для сравнения порядка следования «рисунков вариальности» разработан подход сравнения парных связей и направлений. На рис. 3 представлена визуализация этого подхода для модели HadGEM2-ES. Сравнение «рисунка вариальности» проводилось по сопоставимости двух показателей: числа парных связей (совпадение с обеих сторон от точки направленности изменения данных) и числа направлений от точки к следующей точке. Итоги по разработанным показателям сравнения «рисунков вариальности» сглаженных данных по всем моделям сведены в табл. 3.

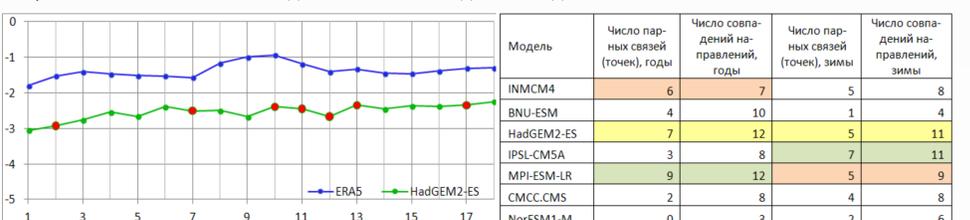


Рисунок 3. Графики скользящих средних с периодом сглаживания для приземных температур для ERA5 и модели HadGEM2-ES (красным цветом выделены точки парных связей относительно ERA5)

Таблица 3. Число парных связей и направлений сглаженных данных для прогнозных моделей относительно зимнего (ноябрь-февраль), летнего (июль-август) сезонов и в целом

Модель	Число парных связей (точек), годы	Число совпадений направлений, годы	Число парных связей (точек), зимы	Число совпадений направлений, зимы
INMCM4	6	7	5	8
BNU-ESM	4	10	1	4
HadGEM2-ES	7	12	5	11
IPSL-CM5A	3	8	7	11
MPI-ESM-LR	9	12	5	9
CMCC.CMS	2	8	4	8
NorESM1-M	0	3	2	6

Наиболее важными из этих показателей служат парные связи, которые характеризуют наибольшую схожесть моделей в локации трех последовательных точек. Поэтому парные связи служат первым приоритетом выбора наилучшей модели среди этих двух характеристик. Наиболее схожими моделями, выделенными цветом в табл. 3, признаются модели MPI-ESM-LR, HadGEM2-ES и INMCM4, для зимнего сезона: IPSL-CM5A-MR, MPI-ESM-LR и HadGEM2-ES. Ввиду низкой вариальности сглаженных данных в летний период расчет этих показателей не целесообразен.

## Заключение

В исследовании разработаны подходы для оценки воспроизводимости глобальными климатическими моделями для региональных проекций на примере анализа приземной температуры воздуха: сравнение числовых показателей всего ряда динамики, выявление сходств и различий в тенденциях и в «рисунках колеблемости» данных. Подходы включают не только анализ всего объема данных, но и анализ их динамики. Для арктического региона, представленного в работе Архангельской областью, Ненецкий АО и республикой Коми, итоги сравнения для среднемесячных многолетних приземных температур с 1979 по 2005 гг. сведены в табл. 4. Наиболее близкой к модели ERA5 по всему массиву данных служит модель HadGEM2-ES, что дает возможность признать ее лучшей в оценке воспроизводимости климата по приземной температуре для выбранного региона. Наименьшую близость к ERA5 демонстрирует модель BNU-ESM. Показано, что в зависимости от выбранного сезона или месяца могут меняться приоритеты выбора модели. Выявлено, что для зимнего периода, приоритеты выбора наилучшей модели смещаются в сторону модели MPI-ESM-LR.

Таблица 4. Итоговые результаты сравнения среднемесячных многолетних приземных температур по трем подходам среди моделей («+» соответствует наиболее близким, «-» наименее близким моделям к модели реанализа ERA5)

Модель	Числовые показатели		Тенденции		Рисунки колеблемости	
	SKO <sub>связи</sub>	Среднее значение	Линейный тренд	Скользящие средние	Диаграммы «box-and-whiskers»	Парные связи и направления
INMCM4	-	-	-	-	-	+
BNU-ESM	-	-	-	-	-	-
HadGEM2-ES	+	+	+	+	+	+
IPSL-CM5A	+	+	+	+	+	+
MPI-ESM-LR	+	+	+	+	+	+
CMCC.CMS	-	-	-	-	-	-
NorESM1-M	+	+	-	-	-	-