

К.С. Кириллина, В.А. Лобанов, Н.Е. Сердитова

ОЦЕНКА БУДУЩЕГО КЛИМАТА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

K.S. Kirillina, V.A. Lobanov, N.E. Serditova

ASSESSMENT OF FUTURE CLIMATE OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

В статье обосновывается необходимость установить, насколько надежно современные климатические модели воспроизводят существующий климат Республики Саха (Якутия) и, тем самым, насколько обосновано их применение для оценки будущего климата на территории республики. Производится выбор наиболее эффективной модели климата для прогнозирования будущих изменений климата Республики Саха (Якутия) и детализация полученных будущих оценок для различных частей республики.

Ключевые слова: современное изменение климата, климатические модели, сценарное моделирование будущих изменений климата, сравнение модельных и фактически наблюдаемых данных.

The necessity to check out the ability of modern climate models to reconstruct the current climate and, thus, to justify their use to predict future climate at the territory of Republic Sakha (Yakutia) is considered. The most adequate climate models are selected for climate change prediction in various parts of Yakutia.

Key words: modern climate change, climate models, climate change scenarios, model and observation data comparison.

Для оценки будущего климата Республики Саха (Якутия) были использованы результаты климатических сценариев до 2100 г. Обобщенные оценки изменения температуры воздуха для всей территории России по ансамблю моделей для трех основных сценариев СМIP5 приведены на сайте ГГО [2]. Как следует из данных моделирования, изменения средней сезонной температуры на территории России в XXI в. будут характеризоваться повышением температуры зимой на территориях всех федеральных округов (далее ФО), кроме Северо-Кавказского и Южного, которое будет заметно превышать ее повышение в летний сезон [1]. Россия остается регионом мира, где потепление климата в течение XXI в. будет существенно превышать среднее глобальное потепление. Абсолютный годовой максимум температуры как показатель экстремальности летней температуры воздуха может заметно увеличиться, в первую очередь, на юге ЕЧР. В то же время следует ожидать заметного смягчения температурного режима в холодное время года, в основном из-за повышения наиболее низкой температуры воздуха на севере ЕЧР, а в конце XXI в. — и на ее юге, где зимы станут бесснежными. Оценки будущих норм среднесезонных температур лета и зимы за три периода XXI в.: 2011–2030 гг., 2041–2060 гг. и 2080–2099 гг. показаны на Рис.1 как средние по ансамблю из 31 модели и по одному сценарию RCP4.5. Основной вывод состоит в том,

что зимние температуры будут расти в большей степени, чем летние и рост зимних температур будет более интенсивным на севере страны.

Если же рассматривать разные сценарии и отдельные федеральные округа Российской Федерации, то по сценарию RCP2.6 рост зимней температуры в ближайшие 20 лет (2011–2030 гг.) варьирует от 0,9 °С в Кавказском ФО до 2,0 °С в Уральском ФО, а по сценарию RCP8.5 от 1,0 °С в Кавказском ФО до 2,1 °С в Уральском и Северо-Западном ФО, т.е. на ближайшую перспективу отличие в сценариях небольшое. Если же рассматривать последние 20 лет XXI в., то рост зимних температур по сценарию RCP2.6 будет уже от 1,4 °С в Кавказском ФО до 3,1 °С в Северо-Западном ФО, а по сценарию RCP8.5 — от 4,4 до 9,2 °С в тех же ФО, т.е. очень существенным как по величине, так и по территории. Летние температуры растут не так значительно и в ближайшие 20 лет как по сценарию RCP2.6, так и по сценарию RCP8.5 их рост будет достаточно однороден по территории России, варьируя всего от 1,3 до 1,5 °С. В конце XXI в. по сценарию RCP2.6 территориальные вариации прироста летней температуры останутся также небольшими 1,8 до 2,0 °С. а по сценарию RCP8.5 — более существенными от 5,6 °С (Дальневосточный ФО) до 6,4 °С (Уральский ФО). При этом по абсолютной величине разные сценарные оценки на конец XXI в. расходятся уже более, чем в 3 раза.

Для территории Якутии зимой в ближайшие 20 лет (2011–2030 гг.) увеличение температуры в зависимости от сценария будет составлять 1,8–1,9 °С, в середине столетия (2041–2060 гг.) повышение составит от 2,9 до 4,7 °С (по среднему сценарию RCP4.5 — 3,6 °С) и в конце XXI в. (2080–2099 гг.) рост температур составит от 2,8 до 9,7 °С (по среднему сценарию RCP4.5 — 4,9 °С). Поэтому по самому неблагоприятному сценарию зимняя температура в Якутии должна повыситься к концу XXI в. почти на 10 °С, а по среднему сценарию — до 5 °С по сравнению с температурой конца XX в. В ближайший же период до 2030 г. увеличение зимней температуры также будет иметь место, но не такое большое, и по всем сценариям составляет около 2 °С. Рост летних температур ожидается в 2 раза меньше, чем зимних: в первой половине — 1,1–1,3 °С, в середине столетия — от 1,9 до 2,9 °С (по среднему сценарию RCP4.5 — 2,3 °С) и в конце XXI в. рост температур составит от 1,9 до 5,6 °С (по среднему сценарию RCP4.5 — 3,0 °С). Соответственно рост весенних температур будет несколько выше, чем летних и максимальное значение роста по самому неблагоприятному сценарию ожидается 6,5 °С в конце XXI в., а рост осенних температур будет несколько меньше, чем зимних с максимальными ожидаемыми значениями к концу века в 8,0 °С

В связи с тем, что в работе [1] оценка будущей температуры воздуха для территории России осуществлена по ансамблю сценариев и только по отдельным федеральным округам страны, целью настоящей статьи является выбор наиболее эффективной модели климата для территории республики Саха (Якутия) и детализация будущих оценок для различных частей республики.

Выбор наиболее эффективной модели был основан на сопоставлении данных климатического моделирования и данных наблюдений за совместный период. Для этой цели были использованы результаты эксперимента по моделированию современного климата за период с 1850 по 2005 г., а в качестве пространственной точки — ближайший к рассматриваемой метеостанции узел сетки с размером ячейки $1^\circ \times 1^\circ$, полученной пространственной интерполяцией данных моделирования.

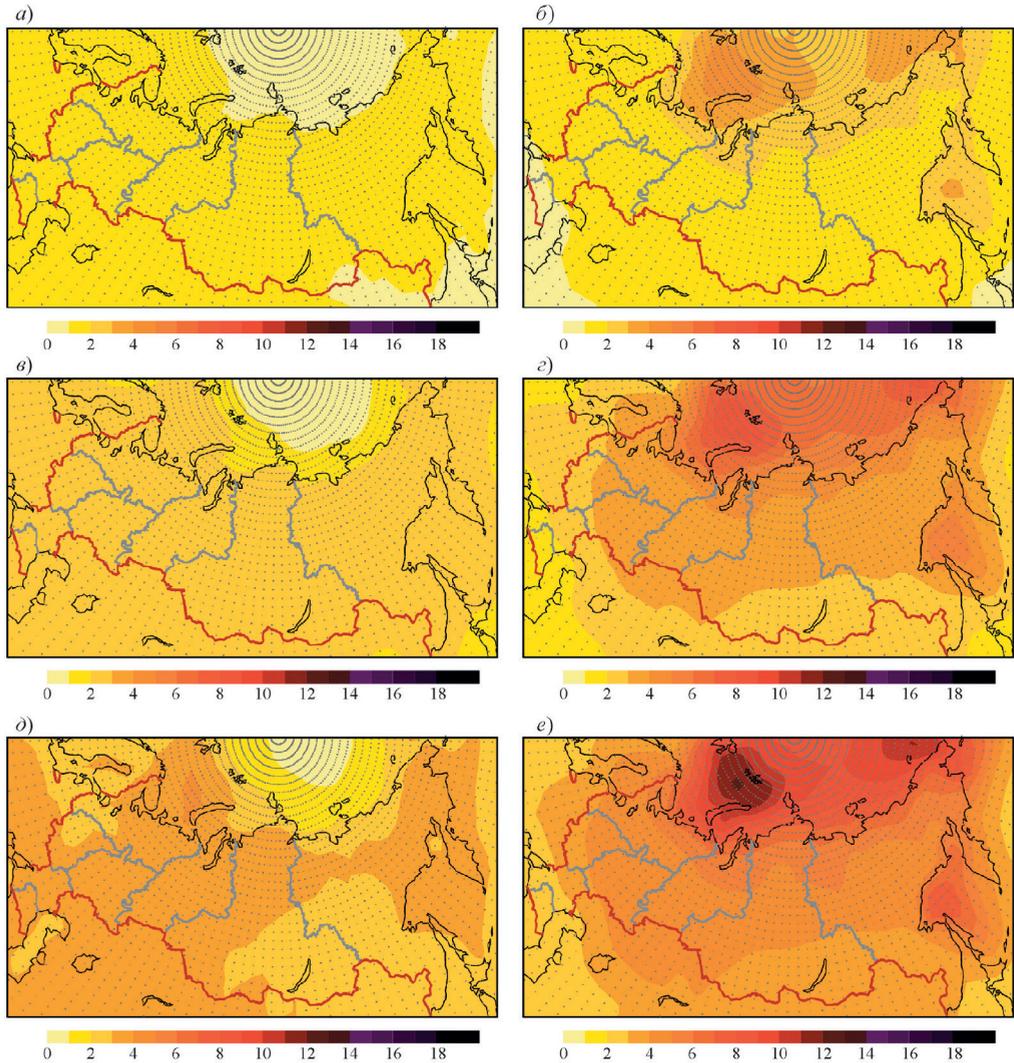


Рис. 1. Изменения средней сезонной температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в периоды 2011–2030 (а, б), 2041–2060 (в, г) и 2080–2099 гг. (д, е) по отношению к концу XX в. летом (а, в, д) и зимой (б, г, е) по оценкам ансамбля из 31 модели СМIP5 для сценария RCP4.5

В качестве климатических моделей выбраны следующие:

- 1) BCC — модель пекинского климатического центра, Китай (Beijing Climate Centre, China, BCC-CM1 Model);
- 2) CNRM — модель центра национальных метеорологических исследований, Франция (Meteo-France, Centre National de Recherches Meteorologiques, CM3 Model, CERFACS);

- 3) HadGEM2 — модель HadCM3 Хэдли центра прогноза климата, Великобритания (Hadley Centre for Climate Prediction, Met Office, UK, HadCM3 Model);
- 4) INM — модель института вычислительной математики РАН, Россия (Institute for Numerical Mathematics (INM), Russia, INM-CM4);
- 5) IPSL — CM5A-MR — модель CM4 V1 Института Лапласа, Франция (Institute Pierre-Simon Laplace IPSL/LMD/LSCE, France);
- 6) MPI — модель института Макса Планка, Германия (Max Planck Institute for Meteorology, Germany, ECHAM5 / MPI OM).

Эти модели среди остальных 25, которые участвовали в проекте CMIP5 по сравнению климатических моделей выбраны из тех соображений, что для в Интернете в свободном доступе [CMIP5] для них имеются данные по всем основным сценариям (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) и по моделированию современного климата, а также в проведенном ранее эксперименте по оценке увеличения глобальной температуры при удвоении концентрации CO_2 , эти модели давали разные величины роста температуры от $2,1\text{ }^\circ\text{C}$ (модель института вычислительной математики, Россия) до $4,4\text{ }^\circ\text{C}$ (модель Хэдли центра и французская модель CNRM).

Для сравнения с данными моделирования были выбраны 5 метеостанций, находящихся в разных частях территории республики Саха (Якутия): метеостанция Верхоянск ($67,57\text{ с.ш.}, 133,40\text{ в.д.}$), находящаяся на севере, метеостанция Якутск ($62,02\text{ с.ш.}, 129,72\text{ в.д.}$) — в центре, метеостанция Олекминск ($60,40\text{ с.ш.}, 120,42\text{ в.д.}$) — на юге, метеостанция Вилюйск — на западе ($63,78\text{ с.ш.}, 121,62\text{ в.д.}$) и метеостанция Усть-Мая ($60,38\text{ с.ш.}, 134,45\text{ в.д.}$) — на востоке республики, как показано на рис. 2. Кроме того, эти метеостанции имеют наиболее продолжительные ряды наблюдений с информацией по 2013 г., начиная с 1830 г. — Якутск, с 1869 г. — Верхоянск, с 1882 г. — Олекминск, с 1863 г. — Вилюйск и с 1893 г. — Усть-Мая.



Рис. 2. Расположение метеостанций на территории Республики Саха (Якутия), выбранных для сравнения с данными моделирования

Выбранные метеостанции характеризуют климатические особенности разных частей территории республики Саха (Якутия) и имеют высокие коэффициенты корреляции с рядами наблюдений на окружающих станциях и меньшие с рядами на станциях в других частях республики. Корреляционные матрицы парных коэффициентов корреляции между рядами на выбранных реперных метеостанциях за разные сезоны года приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Корреляционные матрицы температуры характерных месяцев
между выбранными метеостанциями на территории Республики Саха (Якутия)**

	Верхоянск	Вилуйск	Олекминск	Усть-Мая	Якутск
Январь					
Верхоянск	1				
Вилуйск	0,56	1			
Олекминск	0,28	0,86	1		
Усть-Мая	0,50	0,32	0,19	1	
Якутск	0,65	0,83	0,62	0,61	1
Апрель					
Верхоянск	1				
Вилуйск	0,77	1			
Олекминск	0,16	0,37	1		
Усть-Мая	0,31	0,18	0,15	1	
Якутск	0,75	0,87	0,32	0,10	1
Июль					
Верхоянск	1				
Вилуйск	0,62	1			
Олекминск	0,43	0,82	1		
Усть-Мая	0,55	0,32	0,36	1	
Якутск	0,69	0,82	0,72	0,55	1
Сентябрь					
Верхоянск	1				
Вилуйск	0,72	1			
Олекминск	0,63	0,86	1		
Усть-Мая	0,57	0,51	0,50	1	
Якутск	0,71	0,85	0,75	0,63	1

По результатам табл. 1 можно сделать вывод, что коэффициенты корреляции между станциями в разных частях республики в среднем не очень высокие и связанность зависит от сезона года. Наименьшая территориальная связанность имеет место

весной со средним коэффициентом корреляции $R_{cp} = 0,40$, наибольшая в сентябре ($R_{cp} = 0,67$), затем летом ($R_{cp} = 0,59$) и зимой ($R_{cp} = 0,54$). Наиболее высокая связанность наблюдается между метеостанциями Вилуйск, Олекминск и Якутск с $R = 0,7-0,8$ во все сезоны года кроме весны. Менее всего связана с остальными восточная часть территории (Усть-Мая), для которой коэффициенты корреляции могут быть всего $0,1-0,15$ в весенний сезон. Север же территории (Верхоянск) имеет наибольшую связанность с соседними районами весной ($R = 0,75-0,77$).

Для каждой выбранной метеостанции рассчитывались коэффициенты корреляции между среднемесячными температурами по данным наблюдений и климатического моделирования за совместный период. Пример рассчитанных коэффициентов парной корреляции (R) для метеостанции Верхоянск между данными наблюдений и моделирования дан в табл. 2 для всего периода наблюдений, периода рекомендованного ВМО для расчета климатических норм (1961–1990 гг.) и последнего 30-летнего периода (1976–2005 гг.). В табл. 2 приведены только те месяцы, за которые коэффициенты корреляции были больше 0,5.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между наблюдаемой температурой и результатами моделирования по историческому эксперименту за совместный период по метеостанции Верхоянск, Северная Якутия (для месяцев с $R > 0,5$)

Период, годы	Модель					
	BCC	CNRM	Hadley	INM	IPSL	MPI
Июль						
весь	0,12	-0,1	0,02	0,12	-0,02	0,19
1961–1990	0,04	-0,13	0,1	0,24	-0,12	-0,24
1976–2005	0,51	-0,36	0,1	-0,03	0,02	0,21
Август						
весь	0,13	0,37	-0,1	0,1	0,15	0,13
1961–1990	0,29	0,33	0,1	-0,02	0,26	0,22
1976–2005	-0,02	0,63	-0,24	0,1	0,16	0,52

Из результатов табл. 2 следует, что коэффициенты корреляции между наблюдаемыми и модельными температурами очень низкие и имеют место всего 3 случая, когда они были больше 0,5: для июля и августа и за последний период наблюдений: $R = 0,51$ (BCC, июль), $R = 0,63$ (CNRM, август) и $R = 0,52$ (MPI, август). Для остальных четырех метеостанций получено всего 3 коэффициента корреляции чуть больших 0,5 ($R = 0,51-0,53$) в разные месяцы (сентябрь, декабрь, июль), как правило, за последний период наблюдений и по разным моделям: CNRM, MPI и BCC. Для метеостанции Олекминск во всех случаях коэффициент корреляции был меньше 0,5.

Пример временного графика среднемесячной температуры августа по данным наблюдений и моделирования для метеостанции Верхоянск показан на рис. 3 при $R = 0,63$ за весь период наблюдений.

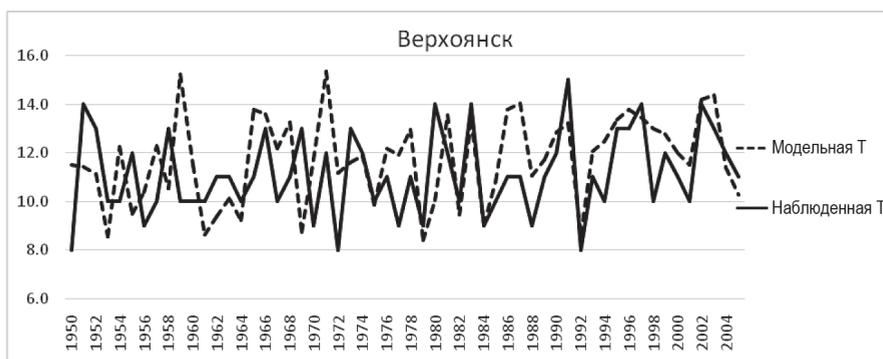


Рис. 3. Хронологические графики наблюдаемой (сплошная линия) и смоделированной (пунктирная линия) температуры августа по метеостанции Верхоянск (для модели CNRM Центра национальных метеорологических исследований Франции)

Полученные низкие значения коэффициентов корреляции между смоделированными и фактическими рядами наблюдений вполне могут быть обусловлены тем, что математические модели климата не в состоянии надежно моделировать температуру воздуха в каждой отдельной точке поверхности земли, где на нее влияют различные азональные факторы. Поэтому дополнительно было проведено сравнение данных моделирования и наблюдений для всей территории Республики Саха (Якутия). При этом данные моделирования осреднялись по 12 узлам сетки, а данные наблюдений — по 96 метеостанциям на территории республики. Периодом для сравнения был выбран период ВМО (1961–1990 гг.), а в качестве исследуемых месяцев — характерные месяцы года: январь и июль. Коэффициенты корреляции между средними территориальными температурами по данным наблюдения и моделирования приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между наблюдаемой температурой на территории Республики Саха (Якутия) и расчетной по моделям за совместный период с 1961 по 1990 г. в рамках исторического эксперимента

Исторический эксперимент	Модель					
	BCC	CNRM	Nad	INM	IPSL	MPI
Январь						
ВМО	0,10	-0,10	-0,30	0,10	-0,31	-0,14
Июль						
ВМО	0,27	-0,20	0,10	0,23	-0,04	0,10

Низкие значения вычисленных коэффициентов корреляции в Табл.3 подтверждают вывод о том, что математические модели климата на данный момент времени не в состоянии достаточно надежно моделировать межгодовую изменчивость температуры воздуха как для отдельных точек пространства, так и осредненную по территории.

Поэтому модели климата можно применять в лучшем случае только для осредненных за период времени данных, например для климатических норм за 20–30-летние периоды. При этих условиях для выбора наиболее эффективной модели климата для территории Республики Саха (Якутия) было проведено сравнение климатических норм, вычисленных за последовательные 30-летние периоды по результатам моделирования и наблюдений. Пример расчета климатических норм и разностей между наблюдаемыми и смоделированными нормами (ΔT °C) за разные интервалы времени дан в табл. 4 для метеостанции Якутск, где ярким цветом выделены отклонения смоделированных температур от наблюдаемых в пределах ± 1 °C, а в первой строке приведены нормы наблюдаемых температур (наблюд.).

Результаты табл. 4 свидетельствуют о том, что отличие норм может составлять до 10–12 °C, причем такие большие отклонения наблюдаются в зимние месяцы и являются положительными, т.е. модельные данные дают более высокие значения зимних температур, чем наблюдается в действительности. В теплые же месяцы года отклонения не превышают 5–6 °C и, как правило, отрицательны, т.е. нормы температур, полученные по данным моделирования, являются заниженными. Аналогичная ситуация с систематическим завышением зимних температур и занижением летних наблюдается и на остальных метеостанциях Якутии. Это обстоятельство связано, вероятно с тем, что модели климата недостаточно эффективно учитывают континентальность климата и дают заниженные значения амплитуды внутригодового хода для долготы Якутии.

Графическое представление отклонений норм смоделированной температуры по отношению к фактически наблюдаемой для всех 5 выбранных метеостанций приведено на рис. 4–8 за месяцы основных сезонов года и за разные периоды осреднения.

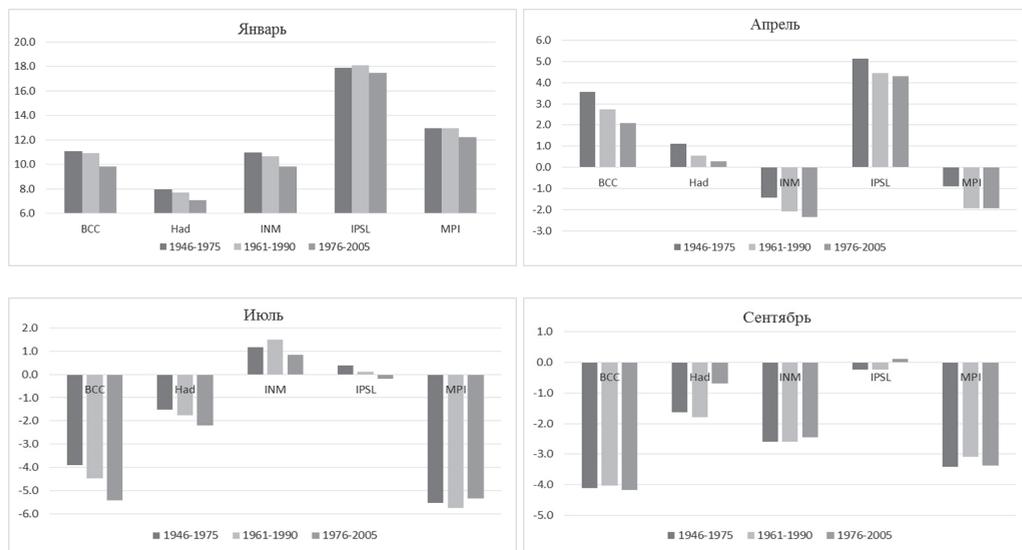


Рис. 4. Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюдаемой на метеостанции Верхоянск за совместный период (исторический эксперимент)

Таблица 4

Разности между климатическими нормами, полученными по данным моделирования
и наблюдений (ΔT °C) для метеостанции Якутск

Модель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1916–1945 гг.												
Наблюд.	-42,4	-35,9	-22,3	-7,7	5,5	15,6	19,0	14,9	6,5	-7,3	-27,1	-39,2
BCC	7,2	6,5	4,6	0,0	-3,7	-5,7	-5,7	-6,4	-6,5	-5,0	-1,5	4,0
CNRM	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
HadGEM2	1,2	2,2	2,3	0,9	2,1	2,8	1,5	0,5	0,6	1,9	2,9	2,1
INM	8,3	3,9	-3,5	-5,3	0,4	1,5	-0,3	-2,4	-4,1	-2,9	2,4	6,8
IPSL	12,3	11,1	7,3	2,4	0,8	1,4	1,2	1,7	0,3	-0,4	4,8	10,3
MPI	10,1	8,9	3,7	0,6	-0,7	-1,9	-2,6	-2,8	-1,6	0,2	4,1	8,8
1946–1975 гг.												
Наблюд.	-42,0	-36,8	-22,7	-7,0	6,1	15,4	18,9	15,2	6,1	-8,0	-29,4	-40,2
BCC	8,0	7,4	4,8	0,2	-3,6	-5,2	-4,9	-6,0	-5,4	-3,5	1,8	6,4
CNRM	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
HadGEM2	0,9	1,6	3,0	1,2	2,6	3,2	1,1	0,6	0,3	1,9	6,0	3,1
INM	7,8	5,2	-2,6	-4,3	0,5	2,2	-0,1	-2,5	-2,7	-1,6	5,3	8,9
IPSL	12,1	11,4	7,7	2,0	1,1	1,9	1,3	1,3	0,3	-0,1	6,9	11,3
MPI	10,8	9,0	4,1	0,8	-1,0	-1,4	-2,8	-2,5	-0,5	-0,1	7,3	9,5
1961–1990 гг.												
Наблюд.	-40,9	-35,9	-21,6	-6,1	6,7	15,4	18,7	15,0	5,7	-8,6	-29,2	-38,9
BCC	6,9	7,0	4,4	-0,5	-4,5	-5,0	-5,0	-5,3	-5,0	2,7	3,1	4,9
CNRM	2,2	8,9	-0,5	-2,8	-2,2	0,3	1,7	1,6	1,2	0,8	3,4	3,5
HadGEM2	0,3	1,3	1,9	0,6	2,0	3,3	0,8	0,7	0,5	2,3	5,3	1,8
INM	7,4	4,0	-3,2	-5,2	0,3	2,0	0,4	-2,0	-2,5	-0,6	5,9	7,4
IPSL	11,2	11,2	7,6	1,3	0,7	1,8	1,4	1,6	0,7	0,4	7,3	10,2
MPI	10,0	8,7	3,9	-0,1	-1,6	-1,5	-2,4	-2,1	0,3	1,2	7,8	9,2
1976–2005 гг.												
Наблюд.	-39,3	-34,1	-21,0	-5,1	7,2	15,9	19,2	15,1	5,9	-8,5	-27,7	-37,9
BCC	6,1	5,7	3,6	-1,8	-4,8	-5,0	-5,7	-5,5	-5,1	-3,1	2,6	4,6
CNRM	1,4	8,7	-0,8	-3,3	-2,7	-0,1	1,4	1,7	1,0	1,3	2,5	3,9
HadGEM2	-0,1	1,3	2,5	0,1	2,1	3,5	0,9	1,0	1,6	2,9	4,6	1,6
INM	6,1	2,0	-3,3	-5,8	0,5	1,6	-0,2	-1,7	-2,4	-0,8	4,7	6,4
IPSL	10,3	9,7	7,0	0,9	0,6	1,5	1,4	2,5	1,3	1,6	6,6	10,0
MPI	8,9	7,9	4,1	-0,4	-1,4	-1,6	-1,9	-2,0	0,0	0,7	6,8	8,9
За весь период наблюдений												
Наблюд.	-42,0	-35,6	-21,9	-6,8	6,1	15,5	18,9	14,9	6,2	-8,1	-28,2	-39,4
BCC	7,2	6,5	4,0	-0,5	-4,0	-5,4	-5,6	-6,0	-5,8	-4,0	1,0	5,0
CNRM	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
HadGEM2	1,2	1,0	2,1	0,8	2,2	3,1	1,2	0,8	0,7	2,1	4,3	2,3
INM	7,7	3,7	-3,4	-4,9	0,6	2,0	-0,1	-2,1	-3,2	-1,7	4,2	7,6
IPSL	12,1	10,4	7,1	1,9	1,1	1,6	1,3	1,7	0,3	0,1	5,8	10,6
MPI	10,2	8,2	3,6	0,3	-1,1	-1,7	-2,4	-2,2	-1,0	-0,1	6,0	9,1

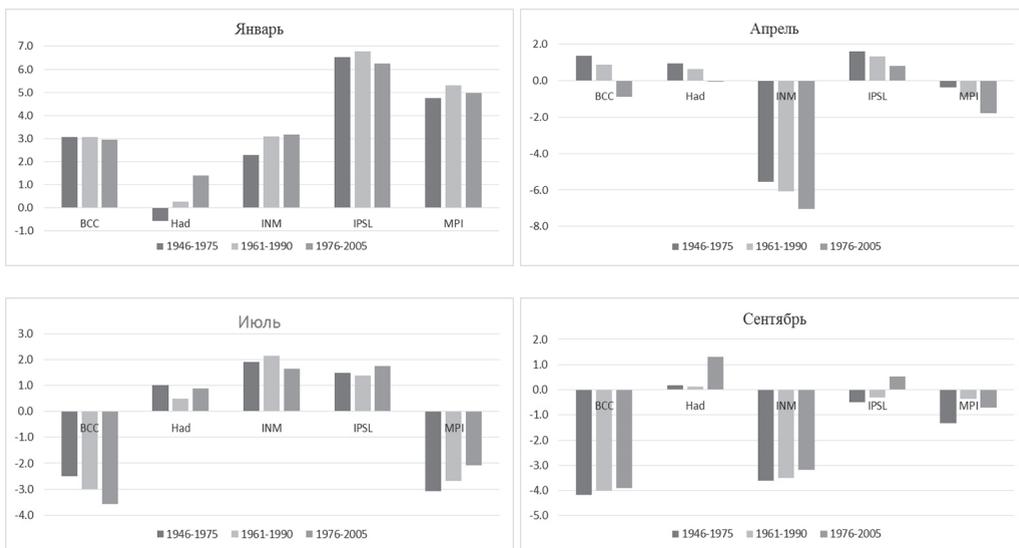


Рис. 5. Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюдаемой на метеостанции Вилюйск за совместный период (исторический эксперимент)

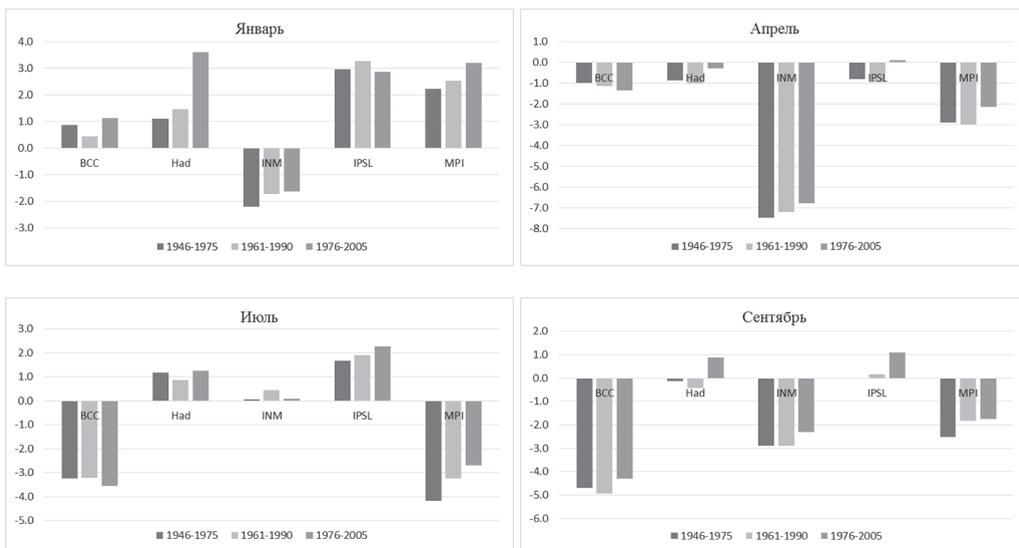


Рис. 6. Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюдаемой на метеостанции Олекминск за совместный период (исторический эксперимент)

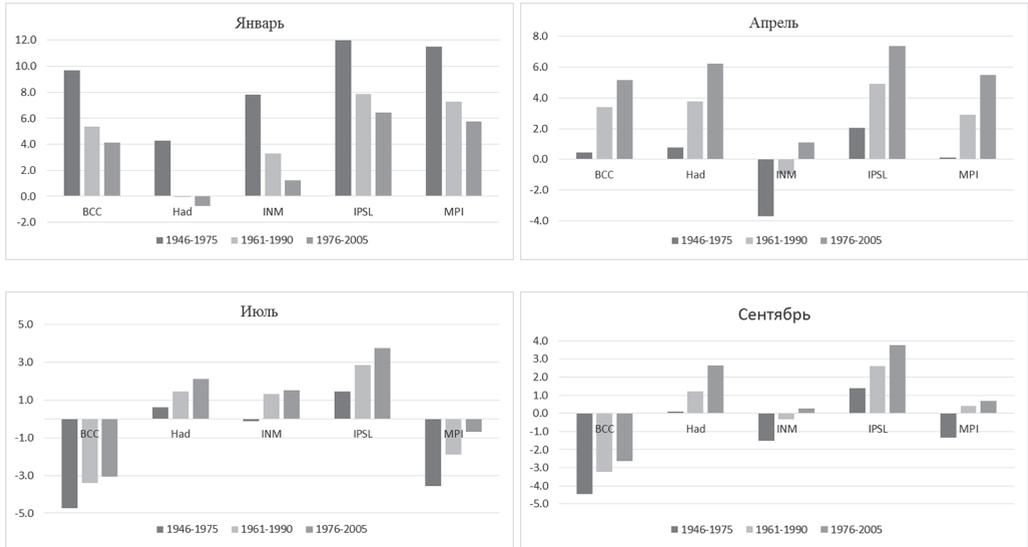


Рис. 7. Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюдаемой на метеостанции Усть-Мая за совместный период (исторический эксперимент)

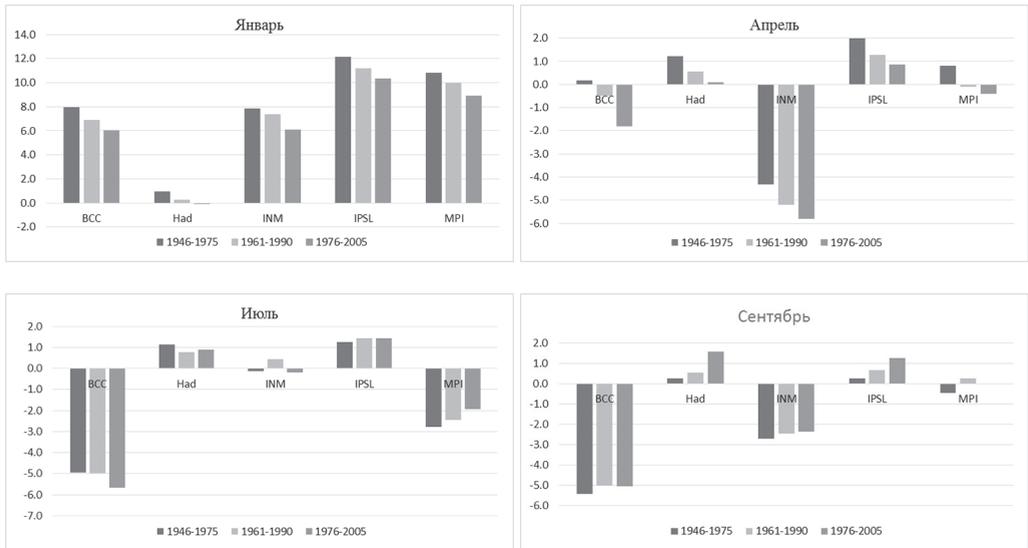


Рис. 8. Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюдаемой на метеостанции Якутск за совместный период (исторический эксперимент)

На основе выполненных расчетов и представленных на рис. 4–8 результатов можно оценить какая модель лучше всего рассчитывает нормы фактической температуры за разные интервалы времени. Причем помимо выборочных 30-летних периодов рассматривался также и весь период наблюдений и период ВМО. В результате по отдельным метеостанциям, месяцам и периодам времени получены следующие выводы:

1. Для метеостанции Верхоянск (Северная Якутия) в месяцы холодного периода года (январь, апрель) больше всего подходит HadGEM2 ($\Delta T = +7...+8$ °C в январе и $\Delta T = +0,3...+0,6$ °C в апреле), а в месяцы теплого периода года — модель IPSL ($\Delta T = -0,2...+0,4$ °C в июле и $\Delta T = -0,2...+0,1$ °C в сентябре).
2. Для метеостанции Вилюйск (Западная Якутия) модель HadGEM2 является наиболее эффективной уже в течение трех сезонов: зима, весна лето ($\Delta T = -1,3...+1,4$ °C в январе, $\Delta T = +0,2...+0,9$ °C в апреле и $\Delta T = +0,5...+1,4$ °C в июле), а осенью наилучшей является модель IPSL ($\Delta T = -0,3...-0,5$ °C в сентябре).
3. Для метеостанции Олекминск (Южная Якутия) в январе наиболее подходит модель ВСС ($\Delta T = +0,4...+1,2$ °C), в апреле наилучшими являются две модели: HadGEM2 ($\Delta T = -0,3...-0,1$ °C) и IPSL ($\Delta T = -1,0...+0,1$ °C), в июле — модель INM ($\Delta T = -0,1...+0,5$ °C) и в сентябре — HadGEM2 — модель ($\Delta T = -0,4...+0,9$ °C).
4. Для метеостанция Усть-Мая (Восточная Якутия) наиболее подходящей для января является модель HadGEM2 ($\Delta T = -0,7...+4,3$ °C), а для остальных характерных месяцев года — модель INM ($\Delta T = -0,7...+4,3$ °C для апреля, $\Delta T = -0,1...+1,5$ °C для июля, $\Delta T = -1,5...+0,3$ °C для сентября).
5. Для метеостанция Якутск (Центральная Якутия): модель Hadley является наилучшей для января ($\Delta T = -0,1...+1,2$ °C); для апреля — модели Hadley ($\Delta T = +0,1...+1,2$ °C) и MPI ($\Delta T = -0,4...+0,8$ °C), для июля — модель INM ($\Delta T = -0,3...+0,4$ °C) и для сентября — модель MPI ($\Delta T = -1,6...+0,2$ °C).

В общем можно сделать вывод, что в зависимости от станции или сезона наилучшими будут разные модели. Как правило, при применении наиболее эффективных моделей погрешности в нормах температур составляют менее 1 °C для теплого периода года. Зимой погрешности в нормах могут составлять и по наилучшим моделям до 4–6 °C, особенно для метеостанции Верхоянск известной как «Полюс холода» со своими локальными особенностями, которые не могут учесть глобальные климатические модели. В целом наиболее эффективной для территории республики можно признать английскую модель HadGEM2 центра Хэдли, которая показала себя наиболее эффективной в 50 % случаев, затем идет российская климатическая модель Института вычислительной математики РАН (INM) — 25 % случаев и французская модель Института Лапласа (IPSL) — 20 % случаев. Для метеостанции Якутск в половине случаев была наиболее эффективна также и немецкая модель Метеорологического института Макса Планка (MPI). Неплохие результаты показывает и модель Центра метеорологических национальных исследований Франции (CNRM), но данные моделирования по ней имеются только с 1950 г., что не дает возможности достаточно надежно оценить ее за многолетний период. Только в одном случае для метеостанции Олекминск и температуры января наилучшие результаты дала модель Пекинского климатического центра (ВСС).

На основе выбранных климатических моделей была дана оценка будущего климата республики Саха (Якутия) на три последующих 30-летних периода времени до конца XXI в.: 2011–2040 гг., 2041–2070 гг. и 2071–2100 гг. Оценка производилась по трем основным сценариям: RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5 по отношению к норме 1976–2005 гг. и с учетом систематической погрешности модельных данных за этот интервал времени. Полученные температурные разности климатических норм по разным сценариям для 5 выбранных метеостанций приведены в табл. 5.

Таблица 5

Сценарные оценки изменения норм температур воздуха на реперных метеостанциях республика Саха (Якутия) до конца XXI в. по отношению к норме за период 1976–2005 гг. в °С

Сценарий	Периоды, месяцы											
	2011–2040 гг.				2041–2070 гг.				2071–2100 гг.			
	I	IV	VII	IX	I	IV	VII	IX	I	IV	VII	IX
Верхоянск												
RCP2.6	7,4	1,9	–0,5	0,3	9,2	1,9	–0,2	1,5	9,4	2,3	0,0	1,4
RCP4.5	9,5	1,2	0,4	2,3	11,8	3,1	2,7	3,3	12,8	3,6	2,5	4,0
RCP8.5	9,6	1,4	0,3	0,4	11,9	3,6	1,3	3,4	17,0	6,3	3,7	5,9
Вилуйск												
RCP2.6	1,9	1,4	3,0	1,2	2,5	1,9	2,6	2,9	3,5	1,7	2,6	2,2
RCP4.5	3,4	0,8	3,7	2,3	4,9	1,9	4,7	3,9	6,9	2,5	5,1	4,2
RCP8.5	3,4	1,1	3,0	1,6	5,7	3,2	4,9	4,4	10,4	5,9	8,1	6,9
Олекминск												
RCP2.6	3,9	–0,4	–	2,4	4,0	0,1	–	2,5	3,0	–0,5	–	2,6
RCP4.5	2,3	–0,9	0,4	2,2	4,3	–0,1	1,0	3,3	5,3	0,4	1,6	4,0
RCP8.5	4,2	–0,6	0,1	1,8	5,1	1,1	1,3	4,8	9,4	3,4	2,1	7,2
Усть–Майя												
RCP2.6	0,1	–	–	–	0,9	–	–	–	1,4	–	–	–
RCP4.5	0,7	1,6	1,7	1,1	2,9	3,8	2,7	1,9	4,3	4,3	2,8	2,6
RCP8.5	0,9	2,9	1,5	1,5	3,7	4,3	2,9	2,4	7,6	6,3	4,1	3,9
Якутск												
RCP2.6	0,6	1,7	–	0,5	1,9	2,1	–	0,4	2,4	2,0	–	0,7
RCP4.5	2,0	1,1	0,1	0,4	4,3	2,5	0,9	0,9	5,4	3,0	1,2	1,6
RCP8.5	1,4	1,3	–0,3	0,1	4,5	3,4	1,2	1,6	8,2	6,1	2,4	4,4

В качестве примера на рис. 9 показан многолетний ряд температур января и июля на МС Якутск с 1916 г., а также значения норм за период наблюдений и сценарных норм за будущие периоды до конца XXI в. на основе трех основных сценариев и по моделям центра Хэдли (HadGEM2) для января и Института вычислительной математики РАН (INM) для июля, дающих наилучшее соответствие с данными наблюдений.

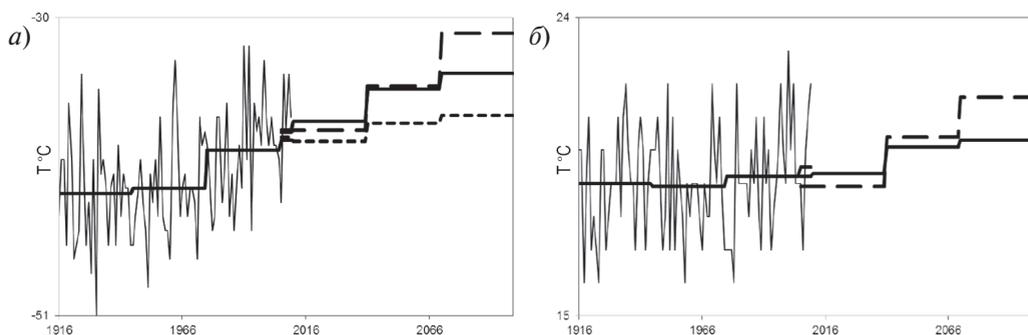


Рис. 9. Многолетние ряды температуры января (а) и июля (б) на метеостанции Якутск и климатические нормы по данным наблюдений и сценарных оценок до конца XXI в.

Из представленных в табл. 5 результатов следует:

- наибольший рост температуры следует ожидать зимой до 4–6 °С в последней трети XXI в. по среднему сценарию RCP4.5, хотя по самому неблагоприятному сценарию RCP8.5 рост температур может быть до 9–10 °С и даже до 17 °С на метеостанции Верхоянск;
- рост весенних (апрель), летних (июль) и осенних (сентябрь) температур будет существенно ниже и в конце XXI в. по RCP4.5 может составлять от 1,2 до 5,1 °С (в среднем 2–3 °С, т.е. в 2 раза меньше, чем зимних), а наибольшие возможные значения роста по сценарию RCP8.5 могут достигать 6–8 °С;
- в ближайшие годы (до 2014 г.) практически по всем сценариям рост температуры ожидается небольшим и будет составлять максимум до 3–4 °С зимой (в среднем 2 °С) и до 3 °С в теплый период (в среднем 1 °С) за исключением зимних температур на метеостанции Верхоянск, где дается увеличение до 7–9 °С;
- закономерности будущего потепления по территории (если исключить метеостанцию Верхоянск как аномальную) состоят в том, что в южной, центральной и восточной частях республики следует ожидать меньшего потепления, чем в северной и западной примерно на 4–8 °С зимой и на 2–3 °С в теплый период года.

Литература

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / Катцов В.М., Семенов С.М.; Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. — М., 2014. — 61 с.
2. Официальный сайт ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова». Раздел «Изменение климата в России в 21 веке (модели СМIP 5)». — Электронный ресурс: [<http://voeikovmgo.ru/ru/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613>].
3. Официальный сайт пятой фазы проекта по сравнению взаимосвязанных моделей Всемирной программы по изучению климата, раздел «Доступ к данным». — Электронный ресурс: [http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_portal.html].