

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕПЛЕНИЯ В РАЙОНЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА

И.И.МОХОВ, А.А.КАРПЕНКО

Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН

На основе модельных результатов в сопоставлении с данными наблюдений и реанализа проведен анализ способности глобальных климатических моделей воспроизводить температурные изменения на Антарктическом полуострове в Южном полушарии и в других регионах с наибольшими трендами потепления у поверхности в последние десятилетия – в Сибири и на Аляске в Северном полушарии. Сделаны оценки роли естественных и антропогенных факторов.

Наибольшие скорости приповерхностного потепления в Южном полушарии отмечены в последние десятилетия на Антарктическом полуострове. Проведен анализ способности глобальных климатических моделей воспроизводить изменения приповерхностной температуры T_a в этом регионе с использованием результатов ансамбля численных расчетов в сопоставлении с данными наблюдений и реанализа. Сделана оценка роли естественных и антропогенных факторов в формировании температурных изменений на Антарктическом полуострове, а также в регионах Северного полушария с наибольшими трендами потепления у поверхности – в Сибири и на Аляске [3].

Для анализа использовались результаты ансамбля численных расчетов для XX века с климатической моделью общей циркуляции (КМОЦ) HadCM3 [9] при различных сценариях: с суммарным учетом естественных и антропогенных воздействий (С-сценарий), а также только при естественных воздействиях (Е-сценарий) и только при антропогенных воздействиях (А-сценарий). Антропогенные воздействия включали изменения парниковых газов в атмосфере и антропогенного сульфатного аэрозоля (с учетом его воздействия на альbedo облаков), а также изменения тропосферного и стратосферного озона. Естественные воздействия включали изменения солнечной радиации и стратосферного аэрозоля из-за вулканических извержений. Для каждого сценария анализировались результаты четырех модельных численных реализаций при разных начальных условиях, выбранных из множества рассчитанных режимов (много сотен модельных лет) без какого-либо внешнего форсинга. Пространственное разрешение КМОЦ HadCM3 – 2,5° по широте и 3,75° по долготе.

Кроме того, анализировались результаты численных расчетов для XX века с глобальной климатической моделью (КМ) ИФА РАН [1, 2] при различных сценариях: с суммарным учетом естественных и антропогенных воздействий (С-сценарий), а также только при естественных воздействиях (Е-сценарий) и только при антропогенных воздействиях (А-сценарий). Антропогенные воздействия включали изменения парниковых газов в атмосфере. Естественные воздействия включали изменения солнечной радиации, связанные с солнечной активностью. Пространственное разрешение КМ ИФА РАН – 4,5° по широте и 6° по долготе.

КМ ИФА РАН относится к классу моделей промежуточной сложности [4] и является единственной российской моделью, участвующей в соответствующем модельном сравнении (EMIC) [8].

Для анализа региональных тенденций изменения приповерхностной температуры в XX веке использовались среднемесячные данные станционных наблюдений для Антарктического полуострова (далее эти данные обозначаются как данные ААНИИ – см. http://www.aari.aq/stations/bell/bell_en.html, а также <http://www.antarctica.ac.uk/met/gjma/>) и для Сибири (далее эти данные обозначаются как данные ВНИИГМИ-МЦД – см. http://meteo.ru/data_temperat_precipitation/) и Аляски (далее эти данные обозначаются как данные IARC – см. <http://www.frontier.iarc.uaf.edu>), а также глобальные данные над сушей для 5-градусных по широте и долготе ячеек (далее эти данные обозначаются как данные CRU – см. <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>) [3, 5]. Кроме того, использовались среднемесячные данные реанализа NCEP/NCAR [6] с 1948 г. и ERA-40 [8] с 1958 г. с разрешением 2,5° по широте и долготе.

Значения положительных трендов среднегодовой приповерхностной температуры (СПТ) для Антарктического полуострова, в частности в районе станции Беллинсгаузен (62° ю.ш., 59° з.д.), для последнего 30-летия XX века по разным данным наблюдений были около 0,3(±0,2) К/10 лет. Близкие оценки трендов СПТ по данным наблюдений получены и в районе станции Фарадей/Вернадский (65° ю.ш., 64° з.д.) на Антарктическом полуострове. Немного большие значения трендов СПТ для Антарктического полуострова оценены по данным ERA-40 и NCEP/NCAR реанализов – около 0,4 К/10 лет (со среднеквадратическими отклонениями от 0,2 до 0,4 К/10 лет). Заметное увеличение среднегодового тренда T_a отмечено в последние годы, в частности в районе станции Фарадей/Вернадский до 0,8 К/10 лет по данным для 1975–2004 гг. в целом (при коэффициенте корреляции 0,56).

Зимой (в июне–августе) для Антарктического полуострова в районе станции Беллинсгаузен положительные тренды для последнего 30-летия XX века были сравнимы с трендами СПТ – 0,3±0,5 К/10 лет по разным данным наблюдений и 0,3±0,4 К/10 лет по данным реанализов. По данным наблюдений в районе станции Фарадей/Вернадский на Антарктическом полуострове величина положительного тренда T_a зимой для последнего 30-летия XX века получена около 0,7 К/10 лет. В последние годы отмечено заметное увеличение тренда T_a зимой, в частности в районе станции Фарадей/Вернадский до 2,0 К/10 лет (при коэффициенте корреляции 0,56), в районе станции Беллинсгаузен – до 0,8 К/10 лет (при коэффициенте корреляции 0,33).

На рис.1 представлены тренды в XX веке среднегодовой приповерхностной температуры (СПТ) T_a для 30-летних скользящих интервалов по данным локальных метеонаблюдений для станции Беллинсгаузен (62° ю.ш., 59° з.д.) на Антарктическом полуострове, Иркутска (52° с.ш., 104° в.д.) в Сибири и Барроу (71° с.ш., 157° з.д.) на Аляске, а также на основе сеточных (5×5° по широте и долготе) данных для соответствующих регионов на Антарктическом полуострове, в Сибири и на Аляске [3]. Величины на рис. 1 характеризуют значения трендов в середине 30-летних интервалов.

Согласно рис. 1 в течение последних десятилетий XX века тренды СПТ dT_a/dt в Сибири (регион Иркутска) и на Аляске (регион Барроу) достигали и даже превышали 0,8 К/10 лет, а на Антарктическом полуострове (район станции Беллинсгаузен) достигали 0,4±0,5 К/10 лет, хотя и были менее статистически значимы, чем для регионов СП. Значимость трендов можно оценить по соответствующим коэффициентам корреляции r на рис. 1б, г, е в сопоставлении с линиями минимальных (без учета уменьшения числа степеней свободы для анализируемого ряда из-за корреляции его последовательных элементов) величин r для статисти-

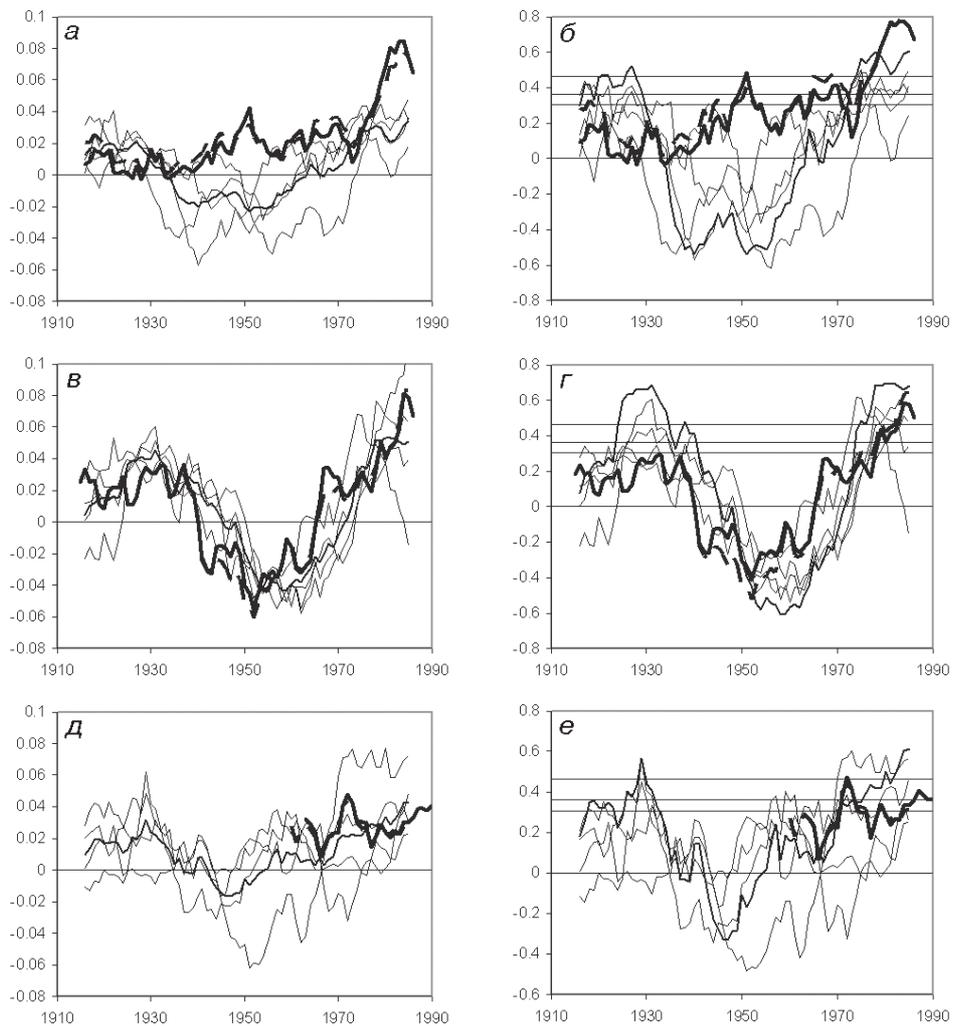


Рис. 1. Тренды dT_a/dt (К/10 лет) в XX веке среднегодовой приповерхностной температуры T_a для 30-летних скользящих интервалов по данным на основе метеонаблюдений и по расчетам с КМОЦ при учете естественных и антропогенных воздействий [9] для регионов Иркутска в Сибири (а), Барроу на Аляске (б) и станции Беллинсгаузен на Антарктическом полуострове (д). Представлены результаты для четырех численных расчетов и для средних по ансамблю значений T_a . Приведены также соответствующие коэффициенты корреляции r (б, в, е). Горизонтальные прямые характеризуют минимальный уровень статистической значимости 90, 95 и 99 %

ческой значимости на уровне 90, 95 и 99 %. Начиная со второй половины 1970-х гг. для Сибири и с начала 1980-х гг. на Аляске регулярно превышает минимальный 99 % уровень статистической значимости трендов СПТ для 30-летних интервалов. На Антарктическом полуострове максимальные тренды СПТ слабее, чем в Сибири и на Аляске. В среднем по данным для второй половины XX века коэффициенты корреляции r близки к минимальным значениям, соответствующим уров-

ню 90 % статистической значимости трендов для района российской станции Беллинсгаузен со значительными колебаниями. При этом в последние годы с учетом данных для начала XXI века отмечается рост значений трендов СПТ на Антарктическом полуострове и их значимости с превышением минимального уровня для 95 % статистической значимости.

Для более детального анализа в табл. 1 представлены оценки трендов СПТ T_a для последнего 30-летия XX века (1970–1999 гг.) по разным данным метеорологических наблюдений и реанализа в трех анализируемых регионах [3]. Наряду с оценками трендов T_a в табл. 1 приведены их среднеквадратические отклонения (СКО – в скобках).

Таблица 1

Тренды среднегодовой приповерхностной температуры T_a в разных регионах для последнего 30-летия XX века по разным данным на основе метеорологических наблюдений и реанализа, а также модельных расчетов значений T_a при естественных и антропогенных воздействиях

Район	Тип данных	Организация	Тренд T_a , К/10 лет 1970–1999 гг.
Антарктический п-ов (Беллинсгаузен)	Наблюдения	ААНИИ	0,30 ($\pm 0,18$)
		CRU	0,29 ($\pm 0,19$)
	Реанализ	ERA-40	0,40 ($\pm 0,21$)
		NCEP/NCAR	0,38 ($\pm 0,36$)
		Модель	HadCM3
Сибирь (Иркутск)	Наблюдения	КМ ИФА РАН	0,12 ($\pm 0,07$)
		ВНИИГМИ	0,74 ($\pm 0,23$)
	Реанализ	CRU	0,75 ($\pm 0,22$)
		ERA-40	0,47 ($\pm 0,16$)
		NCEP/NCAR	0,80 ($\pm 0,22$)
Модель	HadCM3	0,34 ($\pm 0,13$)	
	КМ ИФА РАН	0,16 ($\pm 0,13$)	
Аляска (Барроу)	Наблюдения	IARC	0,81 ($\pm 0,34$)
		CRU	0,83 ($\pm 0,31$)
	Реанализ	ERA-40	0,47 ($\pm 0,25$)
		NCEP/NCAR	0,59 ($\pm 0,37$)
		Модель	HadCM3
КМ ИФА РАН	0,19 ($\pm 0,07$)		

Согласно табл. 1 для сибирского региона хорошо согласуются тренды СПТ по разным данным на основе наблюдений. Хорошее согласие и с оценкой тренда по данным NCEP/NCAR реанализа [6]: $0,8(\pm 0,2)$ К/10 лет. Заметно меньше положительный тренд по данным реанализа ERA-40 [8] – около $0,5(\pm 0,2)$ К/10 лет. Близкие оценки тренда СПТ получены по разным данным на основе наблюдений для региона Аляски – около $0,8(\pm 0,3)$ К/10 лет. Положительные тренды по данным реанализов [6, 8] несколько меньше – около $0,5\pm 0,6$ К/10 лет. Для Антарктического полуострова значения положительных трендов СПТ в районе станции Беллинсгаузен по разным данным наблюдений заметно меньше, чем в Сибири или на Аляске – около $0,3(\pm 0,2)$ К/10 лет. Близкие оценки трендов T_a для последнего 30-летия XX века по данным наблюдений получены и в районе станции Фарадей/Вернадский (65° ю.ш., 64° з.д.) на Антарктическом полуострове. Несколько большие значения трендов СПТ для Антарктического полуострова оценены по данным реанализов [6, 8] – около $0,4$ К/10 лет (с СКО от $0,2$ до $0,4$ К/10 лет). Заметное увеличение среднегодового тренда T_a отмечено в последние годы, в частности в районе станции Фарадей/Вернадский до $0,8$ К/10 лет по данным для 1975–2004 гг. в целом (при коэффициенте корреляции $0,56$).

Зимой (в июне–августе) для Антарктического полуострова в районе станции Беллинсгаузен положительные температурные тренды сравнимы с трендами СПТ – $0,3 \pm 0,5$ К/10 лет по разным данным на основе наблюдений и $0,3 \pm 0,4$ К/10 лет по данным реанализов [6, 8]. По данным наблюдений в районе станции Фарадей/Вернадский на Антарктическом полуострове величина положительного тренда T_a зимой для последнего 30-летия XX века получена около $0,7$ К/10 лет. В последние годы отмечено заметное увеличение тренда T_a зимой, в частности в районе станции Фарадей/Вернадский до $2,0$ К/10 лет (при коэффициенте корреляции $0,56$), в районе станции Беллинсгаузен – до $0,8$ К/10 лет (при коэффициенте корреляции $0,33$).

Наибольшие тренды зимой отмечены в Сибири, в частности в регионе Иркутска T_a увеличивалась в конце XX века со скоростью более 1 К за десятилетие: $1,1(\pm 0,5)$ К/10 лет по данным ВНИИГМИ-МЦД и $1,4(\pm 0,4)$ К/10 лет по данным CRU. По данным реанализа получен больший диапазон оценок: от $0,9(\pm 0,4)$ К/10 лет по данным наблюдений [8] и $1,7(\pm 0,5)$ К/10 лет по данным [6]. Зимние положительные тренды T_a в Сибири получены существенно большими, чем тренды для СПТ. В отличие от Сибири, для Аляски зимой тренды T_a по разным данным на основе наблюдений меньше, чем тренды СПТ, и незначимые – около $0,5(\pm 0,5)$ К/10 лет. А по данным реанализов [6, 8] оценены как отрицательные, но статистически незначимые.

В табл. 1 в сопоставлении с оценками по данным наблюдений и реанализа представлены также тренды СПТ для последнего 30-летия XX века по расчетам с климатической моделью общей циркуляции (КМОЦ) HadCM3 и глобальной климатической моделью промежуточной сложности (КМ) ИФА РАН при учете естественных и антропогенных воздействий (С-сценарий) для модельных ячеек, соответствующих регионам станции Беллинсгаузен, Иркутска и Барроу. На рис. 1 представлены также тренды СПТ для 30-летних скользящих интервалов по расчетам с КМОЦ HadCM3 для XX века при учете естественных и антропогенных воздействий (С-сценарий) для разных регионов. Приведены результаты для четырех численных расчетов при разных начальных условиях и для среднего по ансамблю модельных реализаций. В табл. 1 результаты расчетов с КМОЦ HadCM3 представлены средними по ансамблю из четырех модельных реализаций (САМ) трендами при учете естественных и антропогенных факторов (С-сценарий).

Для Антарктического полуострова оценки тренда СПТ по данным наблюдений находятся в диапазоне модельных оценок. Тренд СПТ больше по расчетам с КМОЦ HadCM3 и меньше – для КМ ИФА РАН. При этом оценки тренда T_a в районе станции Беллинсгаузен для последних десятилетий по наблюдениям находятся в диапазоне оценок и по результатам четырех численных реализаций с КМОЦ HadCM3. Следует отметить, для Антарктического полуострова средний положительный тренд СПТ $0,4(\pm 0,1)$ К/10 лет по расчетам с КМОЦ близок к оценкам по данным реанализов и немного больше, чем по данным наблюдений. При этом тренды СПТ в этом регионе статистически менее значимы, чем для Сибири и Аляски, как по данным наблюдений, так и по модельным расчетам. Тренд СПТ для региона Аляски в КМ ИФА РАН существенно меньше, чем по данным наблюдений.

Для региона Аляски средний по расчетам с КМОЦ положительный тренд СПТ $0,5(\pm 0,2)$ К/10 лет меньше, чем по данным наблюдений, но находится в диапазоне оценок по данным разных реанализов [6, 8]. Следует отметить, что при общем потеплении с учетом антропогенных воздействий возможно проявление эффектов похолодания, связанных с климатической изменчивостью. Так, например, в одном из четырех ансамблевых расчетов для региона Аляски получены отрицательные оценки трендов СПТ в конце XX века, хотя и незначимые. Тренд СПТ для региона Аляски в КМ ИФА АРН существенно меньше, чем по данным наблюдений.

Заметные отличия модельных результатов от данных наблюдений получены для Сибири. В частности, по данным наблюдений среднегодовое потепление в конце XX века для региона Иркутска заметно более быстрое, чем по расчетам. Согласно табл. 1 и рис. 1 КМОЦ HadCM3 заметно переоценивает в этом регионе Северной Евразии эффект аэрозольного выхолаживания в середине и в конце XX века. Следует отметить, что различия модельных результатов и данных наблюдений могут быть также связаны с тем, что оценки КМОЦ характеризуют режимы регионов протяженностью около 200–300 км (2,5° по широте и 3,75° по долготе), а данные наблюдений локальные. Для КМ ИФА РАН пространственное разрешение еще более грубое.

В табл. 2 представлены оценки трендов среднегодовой температуры для последнего 30-летия XX века в разных регионах по расчетам с КМОЦ HadCM3 и КМ ИФА РАН с суммарным учетом естественных и антропогенных воздействий (С-сценарий), а также только при естественных воздействиях (Е-сценарий) и только при антропогенных воздействиях (А-сценарий) [3]. Для КМОЦ HadCM3 приведены значения трендов для средних по ансамблю из четырех численных реализаций (САМ) температурных режимов. Согласно табл. 2 тренды СПТ при Е-сценарии слабы и незначимы во всех трех регионах. Оценки положительных трендов СПТ при С-сценарии близки к соответствующим оценкам при А-сценарии.

Таблица 2

Тренды среднегодовой температуры для последнего 30-летия XX века в разных регионах по модельным расчетам с суммарным учетом естественных и антропогенных воздействий (С-сценарий), только при естественных воздействиях (Е-сценарий) и только при антропогенных воздействиях (А-сценарий)

Район	Организация	С-сценарий	А-сценарий	Е-сценарий
Антарктический п-ов (Беллинсгаузен)	HadCM3	0,43 ($\pm 0,14$)	0,34 ($\pm 0,13$)	0,06 ($\pm 0,14$)
	КМ ИФА РАН	0,12 ($\pm 0,07$)	0,12 ($\pm 0,12$)	0 ($\pm 0,03$)
Сибирь (Иркутск)	HadCM3	0,34 ($\pm 0,13$)	0,32 ($\pm 0,09$)	0 ($\pm 0,08$)
	КМ ИФА РАН	0,16 ($\pm 0,13$)	0,29 ($\pm 0,12$)	0,08 ($\pm 0,13$)
Аляска (Барроу)	HadCM3	0,51 ($\pm 0,18$)	0,54 ($\pm 0,18$)	-0,08 ($\pm 0,02$)
	КМ ИФА РАН	0,19 ($\pm 0,07$)	0,18 ($\pm 0,06$)	-0,07 ($\pm 0,05$)

Таблица 3

Тренды среднегодовой температуры для последнего 30-летия XX века в разных регионах по четырем численным расчетам с КМОЦ при разных начальных условиях: с суммарным учетом естественных и антропогенных воздействий (С-сценарий), только при естественных воздействиях (Е-сценарий) и только при антропогенных воздействиях (А-сценарий)

Район	№ расчета	С-сценарий	А-сценарий	Е-сценарий
Антарктический п-ов (Беллинсгаузен)	1	0,72 ($\pm 0,33$)	0,37 ($\pm 0,34$)	-0,23 ($\pm 0,19$)
	2	0,48 ($\pm 0,16$)	0,26 ($\pm 0,17$)	0,34 ($\pm 0,18$)
	3	0,23 ($\pm 0,18$)	0,33 ($\pm 0,22$)	-0,13 ($\pm 0,16$)
	4	0,30 ($\pm 0,25$)	0,40 ($\pm 0,17$)	0,27 ($\pm 0,33$)
Сибирь (Иркутск)	1	0,48 ($\pm 0,22$)	0,23 ($\pm 0,18$)	0,12 ($\pm 0,20$)
	2	0,35 ($\pm 0,19$)	0,17 ($\pm 0,19$)	0,05 ($\pm 0,15$)
	3	0,18 ($\pm 0,10$)	0,48 ($\pm 0,20$)	-0,09 ($\pm 0,15$)
	4	0,36 ($\pm 0,25$)	0,38 ($\pm 0,12$)	-0,08 ($\pm 0,17$)
Аляска (Барроу)	1	0,64 ($\pm 0,22$)	0,30 ($\pm 0,32$)	0,16 ($\pm 0,18$)
	2	0,39 ($\pm 0,26$)	0,27 ($\pm 0,27$)	-0,17 ($\pm 0,27$)
	3	0,11 ($\pm 0,40$)	0,83 ($\pm 0,38$)	-0,14 ($\pm 0,16$)
	4	-0,15 ($\pm 0,18$)	0,75 ($\pm 0,35$)	-0,17 ($\pm 0,28$)

Существенно отметить, что результаты ансамбля модельных расчетов (см. табл. 3) при разных начальных условиях свидетельствуют о возможности проявления при глобальном антропогенном потеплении отрицательных региональных температурных трендов в отдельных численных реализациях даже для регионов с наибольшими скоростями регионального потепления климата в конце XX века [3]. В целом же согласно полученным модельным результатам в регионах с наибольшей скоростью потепления у поверхности в конце XX века определяющая роль в этих изменениях связана с антропогенным воздействием.

Работа выполнена при поддержке программы РАН, Минобрнауки и РФФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Хон В.Ч., Акперов М.Г., Аржанов М.М., Карпенко А.А., Тихонов В.А., Чернокульский А.В., Сигаева Е.В. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // Доклады РАН. 2005. Т. 402. № 2. С. 243–247.
2. Мохов И.И., Елисеев А.В., Карпенко А.А. Чувствительность к антропогенным воздействиям глобальной климатической модели ИФА РАН с интерактивным углеродным циклом // Доклады РАН. 2005. Т. 407. № 3. С. 400–404.
3. Мохов И.И., Карпенко А.А., Стотт П.А. Наибольшие скорости регионального потепления климата в последние десятилетия с оценкой роли естественных и антропогенных причин // Доклады РАН. 2006. Т. 406. № 1. С. 538–543.
4. Claussen M., Mysak L.A., Weaver A.J., Crucifix M., Fichefet T., Loutre M.-F., Weber S.L., Alcamo J., Alexeev V.A., Berger A., Calov R., Ganopolski A., Goosse H., Lohman G., Lunkeit F., Mokhov I.I., Petoukhov V., Stone P., Wang Zh. Earth system models of intermediate complexity: closing the gap in the spectrum of climate system models // *Climate Dynamics*. 2002. Vol.18. P. 579–586.
5. Karpenko A.A., Mokhov I.I., Stott P. Contribution of natural and anthropogenic causes in regions with large temperature changes during XX century // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. J.Cote (ed.). Geneva: World Climate Research Programme. WMO TD. №1276. 2005. Section 7. P. 9–10.
6. Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation // *Bull. Amer. Met. Soc.* 2001. Vol. 82. P. 247–266.
7. Petoukhov V., Claussen M., Berger A., Crucifix M., Eby M., Eliseev A.V., Fichefet T., Ganopolski A., Goosse H., Kamenskovich I., Mokhov I.I., Montoya M., Mysak L.A., Sokolov A., Stone P., Wang Z., Weaver A. EMIC intercomparison project (EMIP-CO2): Comparative analysis of EMIC simulations of current climate and equilibrium and transient responses to atmospheric CO₂ doubling // *Climate Dynamics*. 2005. Vol. 25. № 4. P. 363–385.
8. Simmons A.J., Gibson J.K. The ERA-40 Project Plan / ERA-40 Project Rep. Ser. 1. ECMWF, Shinfield Park, Reading, UK. 2000. 63 p.
9. Stott P.A. Attribution of regional-scale temperature changes to anthropogenic and natural causes // *Geophys. Res. Lett.* 2003. Vol. 30. 1728, doi:10.1029/2003GL017324.

МОКHOV I.I., KARPENKO A.A.

MODELLING OF WARMING AT THE ANTARCTIC PENINSULA

Analysis of the ability of global climatic models to reproduce temperature variations for the Antarctic Peninsula region in the Southern Hemisphere and for other regions with the largest warming trends (in Siberia and Alaska in the Northern Hemisphere) was performed in comparison with observations and reanalyses data. Assessment of relative contribution of natural and anthropogenic factors was made.