

УДК 551.588

ОЦЕНКИ ГЛОБАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В XIX–XXI ВЕКАХ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИФА РАН С УЧЕТОМ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

© 2002 г. И. И. Мохов, П. Ф. Демченко, А. В. Елисеев, В. Ч. Хон, Д. В. Хворостьянов

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017 Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 05.03.2002 г., после доработки 06.05.2002 г.

Проведен анализ возможных глобальных и региональных изменений в XXI веке на основе расчетов климатической модели (КМ) промежуточной сложности ИФА РАН при различных сценариях антропогенных воздействий. При одном из сценариев содержание CO_2 в атмосфере для 1860–1990 гг. задавалось по данным наблюдений, а для 1991–2100 гг. – в соответствии со сценарием IS92a. При другом сценарии оно также задавалось по данным наблюдений для 1860–1990 гг. и не менялось после 1990 г. В том числе получены оценки возможных изменений глобальной приповерхностной температуры и осадков, а также характеристик атмосферной циркуляции, в частности Северо-Атлантической и Арктической осцилляций. Наряду с этим сделаны оценки региональных изменений гидрологического режима, включая осадки и речной сток в бассейнах Волги и Каспийского моря, крупнейших сибирских рек Оби, Енисея и Лены, границ областей с условиями, благоприятными для формирования сплошной и прерывистой вечной мерзлоты, например в Евразии. Сравнение климатических изменений в КМ ИФА РАН при различных сценариях позволяет оценить возможные глобальные и региональные эффекты вследствие антропогенных воздействий после 1990 г.

ВВЕДЕНИЕ

Последнее десятилетие XX века характеризовалось абсолютно экстремальными температурами, как глобальными, так и для отдельных полушарий, за период инструментальных измерений с середины XIX века [1]. Можно оценить, что с использованием данных [2] (см. также [1]) для 1856–2000 гг. глобальная приповерхностная температура для последнего десятилетия XX века была на $3/4^\circ\text{C}$ больше, чем для первого. При этом около половины этого векового потепления (на $1/3^\circ\text{C}$) произошло за последнее десятилетие XX века. Более чем за 140 лет инструментальных наблюдений 10 глобально наиболее теплых лет были в пределах последних двух 10-летий, из них 9 – после 1990 года. Самым теплым был 1998 год, а последний год XX века был 22-м годом подряд с превышением глобальной температурой средней температуры 30-летнего базового периода, предшествовавшего последнему десятилетию (1961–1990 гг.)¹.

К началу XXI века содержание CO_2 в атмосфере увеличилось почти на треть (около 370 ppmv) по сравнению с доиндустриальным уровнем (около 280 ppmv). При этом со второй половины 1980-х гг. аномалии глобальной среднегодовой приповерх-

ностной температуры уже находятся вне двойного диапазона среднеквадратических отклонений (СКО) относительно среднего режима для первой половины XX века. Более четверти века назад М.И. Будыко предположил, что при антропогенном сценарии развития событий изменение температуры Земли может превысить к 2000 г. аномалии естественных колебаний глобальной температуры, которые наблюдались в течение первой половины XX века. Это произошло уже в 1980-х гг.

Результаты модельного анализа выявили, например, существенное различие потепления конца XX века и потепления 30-х–начала 40-х годов. Потепление в первой половине XX века можно объяснить естественными причинами, связанными, в частности, с изменением солнечного излучения и вулканической активности. Потепление же конца века согласно проведенным расчетам уже существенно антропогенное, связанное с увеличением содержания в атмосфере парниковых газов, главным образом углекислого газа [1]. Это подтверждают и различия происшедших температурных изменений в атмосфере на разных высотах. Так при изменении излучения Солнца потепление должно было бы идти не только у поверхности, в пределах тропосферы, но и с нагревом более высоких слоев атмосферы. В то время как при увеличении содержания парниковых газов в атмосфере должно теплеть внизу, у поверхности и в тропосфере в целом, а стратосфера и мезосфера выхо-

¹ Только что закончившийся 2001 год был на 0.4°C теплее базового режима 1961–1990 гг. При этом он стал 23-м подряд аномально теплым для планеты в целом годом.

лаживаются. Это в настоящее время и происходит – тропосферное потепление сопровождается сильным охлаждением стратосферы и мезосферы. Особенно сильное среднегодовое охлаждение около 0.7 К/год (и около 0.9 К/год зимой) в течение последних десятилетий отмечается вблизи мезопаузы на высотах около 80–90 км [3, 4].

Согласно [5] (см. также [1]) скорость роста температуры Северного полушария в последнее столетие значительно больше, чем характерные скорости изменения в течение последних 1000 лет по палеорекострукциям. Хотя нельзя исключать существенного вклада естественных долгопериодных климатических вариаций, очень быстрое потепление в XX веке, особенно в его последней четверти, в сравнении с предыдущими периодами требует детального и разностороннего анализа возможных антропогенных изменений климата.

В данной работе анализируются возможные климатические изменения в XXI веке при разных сценариях антропогенных воздействий с использованием климатической модели ИФА РАН (КМ ИФА РАН).

ОПИСАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Наиболее полное описание климатической модели ИФА РАН, точнее одной из ее последних версий, приведено в [6] (см. также [7, 8]). Эта модель относится к классу так называемых моделей промежуточной сложности² [9].

Пространственное разрешение КМ ИФА РАН составляет 4.5° по широте и 6° по долготе. Вертикальная структура в модели описывается семью слоями в атмосфере (до уровня 80 км), тремя слоями в океаническом блоке и двумя слоями для суши. Кроме изменения характеристик атмосферы, океана и суши в модели учитываются также биосферные эффекты с использованием модифицированной VATS-схемы [10] и изменения морского льда. В КМ ИФА РАН переменные представляются в виде долгопериодных крупномасштабных компонент с характерными пространственным и временным масштабами в несколько сотен километров и несколько суток и синоптических вариаций. Используемые в модели параметризации синоптических процессов позволяют значительно увеличить эффективность численных расчетов и проводить серии численных экспериментов сравнительно быстро [6, 7].

² Основная информация о 10 моделях этого класса (EMICs – Earth System Models of Intermediate Complexity), в том числе единственной российской (КМ ИФА РАН), доступна на WWW-странице: http://www.pik-potsdam.de/data/emics/table_of_emics.pdf.

К настоящему времени с различными версиями КМ ИФА РАН проведены, в частности, 1000-летние численные эксперименты с полностью взаимодействующими атмосферой и океаном и при неизменном годовом ходе температуры поверхности океана (ТПО), эксперимент на 10000 лет с полностью взаимодействующими атмосферой и океаном, эксперимент с предписанными изменениями ТПО (1903–1994 гг.) по данным GISST2.2 и численные эксперименты с антропогенными воздействиями и учетом вариаций солнечного излучения [11–16]. В том числе анализировались глобальные и региональные климатические изменения на основе модельных расчетов с удвоением и учетверением содержания CO₂ в атмосфере, а также для периода 1860–2100 гг. с учетом изменения содержания углекислого по эмпирическим данным до 1990 г. и согласно сценарию IS92a [17] после 1990 г. [7, 8, 18–30].

В данной работе анализировались результаты численных экспериментов с климатической моделью ИФА РАН для периода с середины XIX века до конца XXI века (1860–2100 гг.) с различными сценариями изменения содержания углекислого газа в атмосфере. Радиационный эффект изменений других парниковых газов в атмосфере пересчитывается в соответствующие дополнительные изменения содержания CO₂ в атмосфере. При этом из сценариев (сценарий I) содержание CO₂ в атмосфере для 1860–1990 гг. задавалось по данным наблюдений, а для 1991–2100 гг. – в соответствии со сценарием IS92a [17] с ростом на 0.7% в год. При другом сценарии (сценарий II) содержание CO₂ в атмосфере для 1860–1990 гг. также задавалось по данным наблюдений и не менялось после 1990 г.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

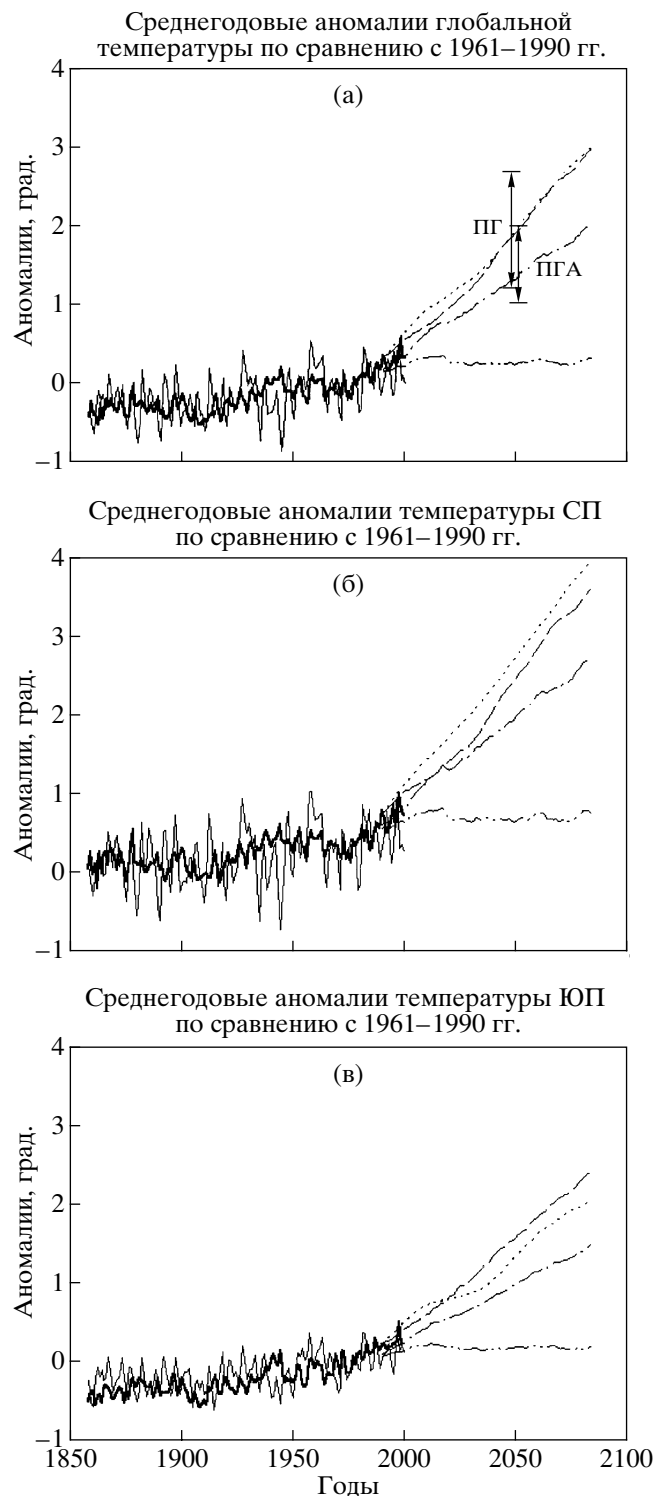
Глобальные и полушарные изменения

Температура

На рис. 1 в сопоставлении с эмпирическими данными [2] для XIX–XX веков представлены изменения межгодовых вариаций приповерхностной температуры δT относительно среднего режима 1961–1990 гг. для Земли в целом δT_{gl} (а), северного (СП) δT_{NH} (б) и южного (ЮП) δT_{SH} (в) полушарий в модели ИФА РАН с середины XIX века до конца XX века при сценарии I изменения содержания парниковых газов в атмосфере. При этом для сравнения приведены эмпирические данные, представляющие собой комбинацию вариаций приповерхностной температуры над континентами и вариаций температуры поверхности океана (ТПО) для Земли в целом и отдельных полушарий для XIX–XXI веков. Результаты расчетов с КМ ИФА РАН для XXI века приведены с 30-летним осреднением. Для сравнения приведены также соответствующие расчеты для XXI века с использованием климатических моделей общей циркуляции

ЕСНАМ4/ОРУС3 [31, 32] и HadCM3 [33, 34], а также при неизменном содержании в КМ ИФА РАН парниковых газов в атмосфере после 1990 г. (сценарий II).

Для всего общего периода инструментальных данных и модельных результатов 1860–2000 гг.



средняя величина δT_{gl} получена равной -0.15°C как по эмпирическим данным, так и для модели ИФА РАН. При этом межгодовая изменчивость δT_{gl} в модели несколько больше, чем по эмпирическим данным. Среднеквадратические изменения (СКО) δT_{gl} равны соответственно 0.28°C и 0.22°C . Для сравнения можно привести соответствующие оценки СКО глобальной приповерхностной температуры атмосферы в КМОЦ: 0.29°C в ЕСНАМ4/ОРУС3 и 0.33°C в HadCM3. При использовании данных для ТПО вместо приповерхностной температуры атмосферы над океанами модельные оценки СКО δT_{gl} естественно уменьшатся.

В соответствии со сценарием IS92a при изменении только содержания углекислого газа в атмосфере глобальная приповерхностная температура в КМ ИФА РАН к середине XXI века возрастет примерно на 1.4°C относительно базового режима 1961–1990 гг. (рис. 1а). Согласно расчетам с климатическими моделями общей циркуляции ЕСНАМ4/ОРУС3 и HadCM3 с изменением и других парниковых газов глобальное потепление к середине XXI века должно быть около 2°C . Различия связаны с учетом в оценках с использованием КМ ИФА РАН изменений радиационного форсинга только за счет углекислого газа и неучетом изменений радиационного форсинга за счет других парниковых газов.

На рис. 1 приведены также диапазоны неопределенности соответствующих оценок с использованием различных климатических моделей общей циркуляции (9 моделей) для сценария IS92a изменения содержания парниковых газов в атмосфере (IS92a-ПГ), а также с учетом дополнительного изменения содержания аэрозоля (IS92a-ПГА) [1].

В последнем 30-летнем периоде XXI века глобальная приповерхностная температура в КМ ИФА РАН, согласно полученным результатам, только за счет увеличения содержания углекислого газа в атмосфере по сценарию IS92a должна возрасти относительно базового режима (1961–1990 гг.) примерно на 2.0°C , а для СП и ЮП – при-

Рис. 1. Вариации (межгодовые для периода 1860–2000 гг. и при 30-летнем скользящем осреднении для периода 1990–2100 гг.) приповерхностной температуры ($^\circ\text{C}$) для Земли в целом δT_{gl} (а), северного (СП) δT_{NH} (б) и южного (ЮП) δT_{SH} (в) полушарий в КМ ИФА РАН при сценариях I (сплошная тонкая и штрихпунктирная кривые) и II (штрихпунктир-пунктирная кривая) антропогенных изменений в сопоставлении с расчетами на основе климатических моделей общей циркуляции ЕСНАМ4/ОРУС3 (пунктир) и HadCM3 (штриховая кривая) и эмпирическими данными (жирная кривая). Вертикальные отрезки характеризуют диапазон неопределенности модельных оценок к середине XXI века при сценарии IS92a изменения содержания парниковых газов (ПГ), а также аэрозоля (ПГА) в атмосфере.

Нормированные осадки

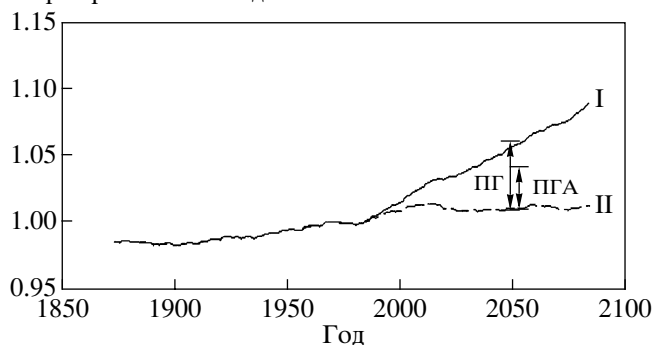


Рис. 2. Нормированные вариации глобальных осадков при 30-летнем скользящем осреднении для периода 1860–2100 гг. в КМ ИФА РАН при сценариях I (сплошная кривая) и II (штриховая кривая) антропогенных изменений. Вертикальные отрезки характеризуют диапазон неопределенности модельных оценок к середине XXI века при сценарии IS92a изменения содержания парниковых газов (ПГ), а также аэрозоля (ПГА) в атмосфере.

мерно на 2.6°C и 1.5°C соответственно. При сценарии II глобальная приповерхностная температура в КМ ИФА РАН возрастает в XXI веке при неизменности содержания углекислого газа в атмосфере после 1990 г. примерно на 0.3°C , а для СП и ЮП — примерно на 0.4°C и 0.2°C , соответственно.

Стоит отметить, что при совместном учете в сценариях (IS92a, в частности) возможных антропогенных изменений в атмосфере содержания парниковых газов и аэрозоля радиационный и температурный эффекты из-за других парниковых газов, кроме углекислого, существенно компенсируются противоположными по знаку эффектами за счет атмосферного аэрозоля, в частности сульфатного.

Таблица 1. Глобальные осадки, в том числе отдельно над сушей и океаном, по модельным расчетам в сопоставлении с различными эмпирическими данными [35–40] и данными реанализа NCEP/NCAR [41]

Осадки, мм/год	Глобальные	Суша	Океан
КМ ИФА РАН (1860–1960 гг.)	1002	714	1127
КМ ИФА РАН (1961–1990 гг.)	1012	722	1138
Эмпирические данные	964–1130	694–800	1066–1270
Реанализ (1958–1998 гг.)	978	776	1059

Осадки

На рис. 2 представлены относительные вариации глобальных осадков $Pr/(Pr)_0$, нормированные на их среднее значение для базового периода 1961–1990 гг., в модели ИФА РАН с середины XIX века до середины XXI века при 30-летнем скользящем осреднении для двух сценариев (I и II) антропогенных изменений.

В табл. 1 модельные оценки осадков сравниваются с различными эмпирическими данными для глобальных осадков, в том числе отдельно над сушей и океаном [35–40], и с данными реанализа NCEP/NCAR [41]. Согласно табл. 1, средние значения осадков в модели, в том числе отдельно над сушей и океаном, находятся в диапазоне неопределенности эмпирических данных и результатов реанализа. При этом межгодовая изменчивость глобальных осадков, характеризуемая СКО, в КМ ИФА РАН ($12\text{--}13$ мм/год) меньше, чем по эмпирическим данным [40] для периода 1979–1998 гг. (21 мм/год) и по результатам реанализа для периода 1958–1998 гг. [41] (26 мм/год). В то же время СКО межгодовой изменчивости глобальных осадков в КМ ИФА РАН получено больше, чем в ECHAM4/OPYC3 (около 4 мм/год) и HadCM3 (около 5 мм/год).

В соответствии со сценарием IS92a при изменении только содержания углекислого газа в атмосфере глобальные осадки в КМ ИФА РАН к середине XXI века должны возрасти примерно на 6% относительно базового режима 1961–1990 гг. (рис. 2). На рис. 2 приведены также диапазоны неопределенности соответствующих оценок с использованием различных климатических моделей общей циркуляции для сценария IS92a изменения содержания парниковых газов в атмосфере (ПГ), а также с учетом дополнительного изменения содержания аэрозоля (ПГА) [1]. Изменения глобальных осадков в модели промежуточной сложности соответствуют верхней границе соответствующего диапазона неопределенности для 9 КМОЦ при сценарии IS92a-ПГ. Нижней границе диапазона неопределенности соответствуют изменения глобальных осадков менее 1% к середине XXI века как для сценария IS92a-ПГ, так и для сценария IS92a-ПГА.

К концу XXI века глобальные осадки в КМ ИФА РАН согласно полученным результатам должны возрасти относительно базового режима (1961–1990 гг.) примерно на 10%. При сценарии II глобальные осадки в КМ ИФА РАН возрастают в XXI веке при неизменности содержания углекислого газа в атмосфере после 1990 г. на величину около 1%.

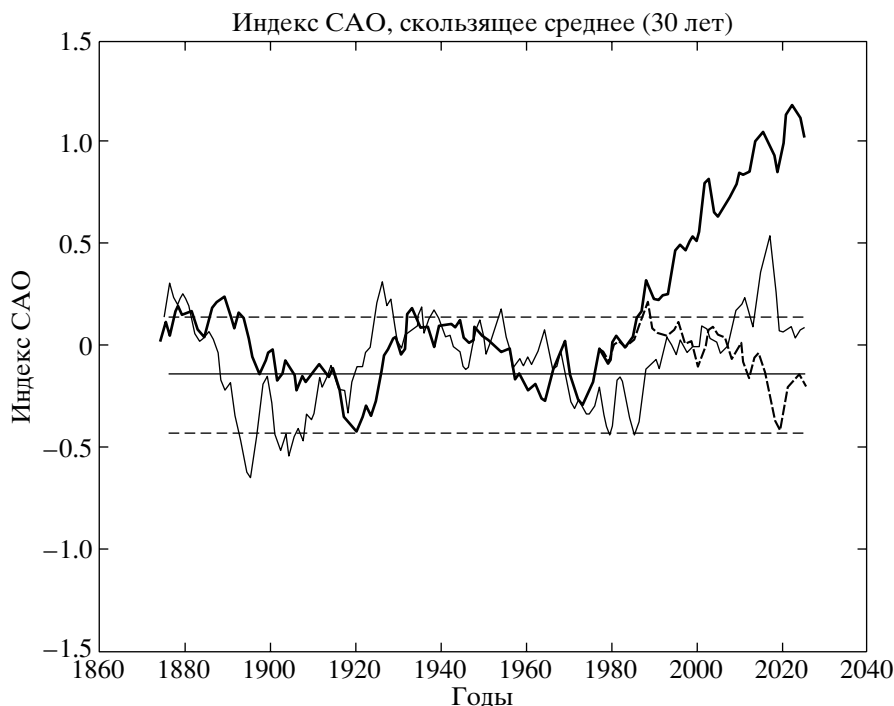


Рис. 3. Вариации индекса Северо-Атлантической осцилляции при 30-летнем скользящем осреднении для периода 1860–2040 гг. в КМ ИФА РАН при сценариях I (сплошная жирная кривая) и II (штриховая жирная кривая) антропогенных изменений в сопоставлении с соответствующими изменениями индекса САО в КМОЦ ЕСНАМ4/ОРУС3 при сценарии IS92a антропогенных изменений (сплошная тонкая кривая). Приведены также среднее значение индекса САО (тонкая прямая) и его СКО (тонкие штриховые линии) для численного эксперимента без антропогенного воздействия по КМОЦ ЕСНАМ4/ОРУС3.

Атмосферная циркуляция

В качестве индикатора изменений циркуляционного режима атмосферы анализировался, в частности, индекс Северо-Атлантической осцилляции (САО) [42, 43]. С САО связаны существенные вариации климатического режима в Северном полушарии (СП) в XX веке. Индекс САО определяется нормированной (на СКО) разницей давлений на уровне моря для центров действия атмосферы в Северной Атлантике – Азорского антициклона и Исландского циклона

$$I_{\text{CAO}} = (P_{\text{Az}} - \langle P_{\text{Az}} \rangle) / \sigma_{\text{Az}} - (P_{\text{Ic}} - \langle P_{\text{Ic}} \rangle) / \sigma_{\text{Ic}}.$$

Здесь P_{Az} и P_{Ic} – давление в Азорском антициклоне и Исландском циклоне соответственно, угловые скобки обозначают осреднение за определенный период времени, а σ_{Az} и σ_{Ic} – соответствующие СКО за тот же период.

Кроме того, анализировались изменения характеристик Арктической Осцилляции (АО) [44]. Следует отметить, что несмотря на название, АО характеризует циркуляционный режим атмосферы не только арктических широт, а значительной части СП, кроме тропических широт (20–90° N). Индексы САО и АО взаимосвязаны.

Многолетние изменения характеристик САО в КМ ИФА РАН в сопоставлении эмпирическими

данными анализировались в [7, 8] без антропогенного форсинга. В [23] проведен также анализ расчетов изменений зимних индексов САО и АО с учетом изменений содержания углекислого газа в атмосфере.

Проведено сравнение межгодовых вариаций зимнего индекса САО (декабрь–март) по результатам численных расчетов КМ ИФА РАН при сценарии IS92a (I) увеличения углекислого газа в атмосфере с соответствующими вариациями по данным наблюдений в XIX–XX веках. Модель хорошо воспроизводит эмпирическую межгодовую дисперсию индекса САО. По эмпирическим данным СКО САО равно 1.1 для периода 1860–1997 гг. (с нормировкой индекса для этого периода), в КМ ИФА РАН для этого же периода СКО оценено равным 1.2 и при сценарии I, и при сценарии II. Для КМОЦ ЕСНАМ4/ОРУС3 соответствующая величина СКО САО получена равной 1.9 и 1.8 в численных экспериментах при антропогенном сценарии IS92a и без антропогенного воздействия.

Следует отметить, что корреляция индексов САО в КМ ИФА РАН и по эмпирическим данным для всего периода 1860–1997 гг. мала, а для отдельных подпериодов даже отрицательна. Тем не менее для последних десятилетий с начала

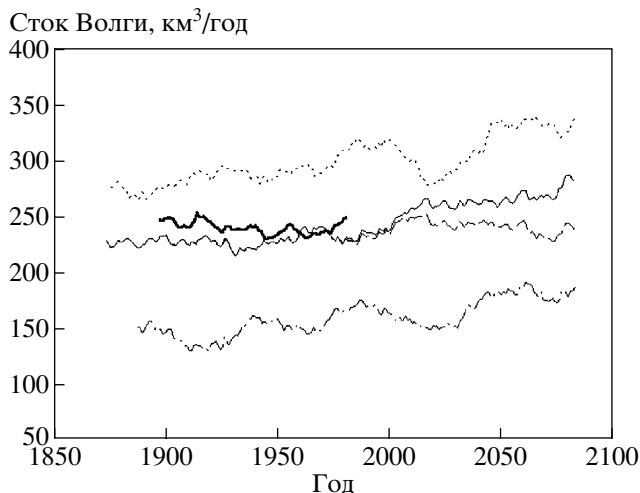


Рис. 4. Вариации стока Волги при 30-летнем скользящем осреднении для периода 1990–2100 гг. в КМ ИФА РАН при сценариях I (сплошная тонкая) и II (штриховая кривая) антропогенных изменений в сопоставлении с расчетами на основе климатических моделей общей циркуляции ECHAM4/OPYC3 (пунктир), HadCM3 (штрих-пунктирная кривая) и эмпирическими данными (жирная кривая).

1970-х до конца 1990-х годов корреляция получена значимой на уровне 90%.

На рис. 3 приведены изменения зимнего индекса САО по результатам численных расчетов КМ ИФА РАН с середины XIX века до середины XXI века при 30-летнем скользящем осреднении для двух сценариев (I и II) антропогенных изменений. Для сравнения на рис. 3 приведены также соответствующие изменения индекса САО для КМОЦ ECHAM4/OPYC3 при сценарии IS92a антропогенных изменений, а также среднее значение индекса и его СКО в численном эксперименте без антропогенных воздействий. Индексы при этом нормировались на СКО для 100-летнего периода 1861–1960 гг. Согласно полученным результатам, средние значения индекса САО в КМ ИФА РАН при антропогенном сценарии I продолжают расти в XXI веке. При этом они (и различия со сценарием II) достигают уровня СКО межгодовой изменчивости XIX–XX веков к концу первой четверти XXI века.

Следует также отметить, что модельные результаты, как и эмпирические данные (а также результаты палеорекоkonструкций), проявляют положительную корреляцию периода и амплитуды квазидесятилетней цикличности (КДЦ) САО [8, 23]. В частности, в [8] это получено с использованием метода [45, 46] на основе результатов 1000-летних численных расчетов с КМ ИФА РАН без антропогенного воздействия при взаимодействующих атмосфере и океане, тогда как при неизмен-

ном годовом ходе ТПО в модели значимой связи амплитуды и периода КДЦ САО не выявлено.

При анализе результатов численных экспериментов с КМ ИФА РАН с антропогенными воздействиями выявлена значимая на уровне не менее 95% связь периода и амплитуды КДЦ САО при сценарии I, тогда как при сценарии II эта связь получена менее значимой (с соответствующими коэффициентами регрессии, значимыми на уровне СКО). При сценарии I выявлено существенное увеличение амплитуды и периода КДЦ САО в конце XX века (с максимумами амплитуды и периода на стыке XX и XXI веков) по сравнению со сценарием II. Соответствующее увеличение амплитуды и периода КДЦ САО в конце XX–начале XXI века выявлено и в КМОЦ ECHAM4/OPYC3 при сценарии IS92a. При этом корреляция амплитуды и периода в КМОЦ ECHAM4/OPYC3 при антропогенном сценарии IS92a также получена более значимой, чем в отсутствие антропогенного воздействия.

Региональные изменения

Гидрологический режим в бассейне Каспийского моря

Вариации гидрологического цикла в бассейне Каспийского моря – в числе сильнейших региональных вариаций в XX веке. Это проявилось в сильных изменениях уровня Каспия – самого большого в мире замкнутого водного резервуара, основной сток в который дает Волга. Уровень Каспийского моря может служить важным индикатором не только региональных, но и глобальных климатических изменений [47, 48].

Площадь акватории Каспийского моря составляет 380 тыс. км², общая площадь водосбора впадающих в море рек равняется 1837 тыс. км². Вариации уровня моря связаны в значительной степени со стоком Волги и видимым испарением с поверхности моря. На сток Волги приходится около 82% от общего речного стока, что составляет в среднем около 240 км³ в год. Изменения стока Волги, в свою очередь, определяются главным образом изменениями общего количества осадков на водосборе [47–49]. В свою очередь осадки зависят от циклонической активности в атмосфере, в том числе от путей северо-атлантических и средиземноморских циклонов и их интенсивности [50, 51].

При пространственном разрешении климатической модели ИФА РАН (4.5° по широте и 6° по долготе) на водосбор Волги приходится 18 модельных ячеек. Речной сток Q в модели определялся как разность между осадками P и испарением E на водосборе.

На рис. 4 представлены соответственно среднегодовые значения стока Волги по данным чис-

ленных экспериментов с КМ ИФА РАН с середины XIX века до конца XXI века при сценарии IS92a (I) в сопоставлении с данными наблюдений при 30-летнем скользящем осреднении [28]. Для сравнения приведены соответствующие результаты расчетов с климатическими моделями общей циркуляции ECHAM4/OPYC3 и HadCM3. Кроме того, приведены изменения стока Волги для КМ ИФА РАН (II) при неизменном содержании углекислого газа в атмосфере после 1990 г. Сравнение двух сценариев (I и II) для КМ ИФА РАН позволяет оценить возможные в рамках данной версии модели изменения стока Волги в XXI веке вследствие антропогенных воздействий после 1990 г.

Среднее значение стока Волги по данным наблюдений для периода 1882–1996 гг. составляет $245 (\pm 44)$ км³/год, а среднее значение стока для того же периода по модельным расчетам для КМ ИФА РАН равно $230 (\pm 45)$ км³/год. В скобках приведены СКО. Оценка стока для модели недооценивает эмпирическую всего на 6% – на одну треть величины СКО. Межгодовая изменчивость стока, характеризуемая СКО, в модели практически совпадает с оцененной по эмпирическим данным [28].

Среднее значение осадков в бассейне по данным наблюдений для периода 1900–1996 гг. составляет $544 (\pm 57)$ мм/год, а среднее значение региональных осадков для того же периода по модельным расчетам для КМ ИФА РАН равно $603 (\pm 47)$ мм/год. В скобках приведены СКО. Оценка осадков для модели переоценивает эмпирическую примерно на 11% – на величину СКО. Межгодовая изменчивость стока, характеризуемая СКО, в модели несколько меньше (почти на 18%), чем по эмпирическим данным [28].

Как видно из рис. 4, различия между оценками стока Волги в разных моделях заметно больше, чем для разных сценариев (I и II) изменений стока с КМ ИФА РАН. При заметных различиях все модели, тем не менее, выявили общую тенденцию увеличения осадков в бассейне Каспийского моря и стока Волги к концу XXI века. В целом сток Волги в XXI веке в КМ ИФА РАН увеличивается по сравнению с XX веком на 18% при сценарии I и на 6% при сценарии II. Отмечена также тенденция увеличения изменчивости стока в XXI веке по сравнению с XX веком на 11–13% при сценариях I и II [28].

Сток крупнейших сибирских рек в Северный Ледовитый океан

Аналогичный анализ был проведен и для гидрологического режима крупнейших сибирских рек – Оби, Енисея и Лены, впадающих в Северный Ледовитый океан. Изменения гидрологичес-

кого цикла в бассейнах сибирских рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, могут существенно изменить режим солености океана из-за изменения стока таких крупнейших рек, как Обь, Енисей, Лена. Вследствие этого возможны заметные изменения не только регионального, но и глобального климатического режима. Это связано с изменением режима формирования морского льда, океанической термохалинной циркуляции, в том числе Атлантической термохалинной циркуляции [1, 52, 53].

Площадь бассейна Оби около 3 млн. км². Сток Оби составляет в среднем около 400 км³ в год. На водосборе выпадает в целом около 540 мм осадков в год. Площадь бассейна Енисея около 2.6 млн. км². Сток Енисея примерно 610 км³ в год. Среднее количество осадков на водосборе около 560 мм в год. Площадь бассейна Лены около 2.5 млн. км². Сток Лены составляет в среднем около 530 км³ в год. Среднее количество осадков на водосборе Лены около 460 мм в год – заметно меньше, чем для бассейнов Енисея и Оби [54].

В [22, 27] проведен анализ изменений среднегодовых значений осадков на водосборе и стока Оби, Енисея и Лены по результатам численных экспериментов с климатическими моделями, в том числе КМ ИФА РАН, для периода 1860–2100 гг. при сценарии IS92a.

Среднее значение стока Оби по данным наблюдений [55, 56] для периода 1930–1984 гг. составляет $134 (\pm 21)$ мм/год, а средние значения стока для того же периода, полученные в модельных расчетах, равны $146 (\pm 41)$ мм/год для КМ ИФА РАН. В скобках приведены СКО. Оценка стока в модели превышает эмпирическую менее, чем на 9% – примерно на половину величины эмпирического СКО. Межгодовая изменчивость стока, оцениваемого разностью осадков и испарения в бассейне, в модели почти вдвое больше, чем по эмпирическим данным для периода 1930–1995 гг.

Среднее значение стока Енисея по данным наблюдений [55, 56] для периода 1936–1994 гг. составляет $233 (\pm 18)$ мм/год, а средние значения стока для того же периода, полученные в КМ ИФА РАН равны $256 (\pm 61)$ мм/год. Оценка стока в модели больше эмпирической на 10% – это несколько больше величины СКО по данным наблюдений. Межгодовая изменчивость стока в модели существенно – более чем втрое – превышает эмпирическую для периода 1936–1994 гг.

Среднее значение стока Лены по данным наблюдений [55, 56] для периода 1935–1994 гг. составляет $216 (\pm 26)$ мм/год, а среднее значение стока для того же периода, полученное в КМ ИФА РАН равно $76 (\pm 25)$ мм/год. Оценка модельного стока для Лены значительно, почти втрое, недооценивается по сравнению с эмпирической. Это связано с переоценкой регионального испарения в

Таблица 2. Тренды стока Q и осадков в бассейнах P сибирских рек (в мм на единицу площади водосбора за 100 лет) по модельным расчетам для XX и XXI веков. В скобках приведены соответствующие СКО

$Q=P-E$, мм/год	$100dQ/dt$	Обь	Енисей	Лена
XX	КМ ИФА РАН	11 (± 13)	15 (± 20)	13 (± 8)
	КМОЦ	2–33 (± 10 –12)	2–21 (± 9 –11)	8–14 (± 9 –12)
XXI	КМ ИФА РАН	56 (± 14)	48 (± 18)	65 (± 9)
	КМОЦ	31–36 (± 12 –13)	43–51 (± 11 –12)	56–67 (± 10 –12)
P , мм/год	$100dQ/dt$	Обь	Енисей	Лена
XX	КМ ИФА РАН	23 (± 17)	33 (± 24)	28 (± 11)
	КМОЦ	24–50 (± 12 –13)	32–51 (± 9 –11)	23–30 (± 9 –11)
XXI	КМ ИФА РАН	95 (± 20)	91 (± 22)	95 (± 12)
	КМОЦ	62–81 (± 14 –17)	102–120 (± 11 –15)	120–126 (± 11 –12)

модели. При этом величина осадков в бассейне Лены в КМ ИФА РАН (461 мм/год) практически совпадает с эмпирическими данными (462–464 мм/год) [54, 57, 58]. Межгодовая изменчивость стока в модели практически совпадает с эмпирической для периода 1935–1994 гг.

В табл. 2 представлены модельные оценки трендов стока Оби, Енисея и Лены, а также осадков в их бассейнах в КМ ИФА РАН для XX и XXI веков. Для сравнения в табл. 2 приведены соответствующие тренды для климатических моделей общей циркуляции ЕСНАМ4/ОРУС3 и HadCM3. В скобках указаны СКО соответствующих коэффициентов линейных регрессий. Как видно из табл. 2, тренды стока сибирских рек в XX веке, за исключением стока Оби и, может быть, Енисея, в HadCM3 незначимы. Для XXI же века тренды стока всех рек оценены значимыми для всех трех моделей. Тенденции изменения осадков во всех случаях оценены значимыми. При этом тренды как осадков, так и стока в XXI веке значительно (за исключением стока Оби в HadCM3) увеличиваются по сравнению с XX веком. Согласно табл. 2, значения трендов в моделях в целом достаточно хорошо согласуются между собой.

Выявлено общее увеличение модельного стока сибирских рек в целом для XXI века по сравнению с XX веком. Выявлена также тенденция увеличения диапазона вариаций стока сибирских рек. Общее увеличение модельного стока сибирских рек в целом для XXI века по сравнению с XX веком связано с соответствующим увеличением осадков в бассейнах рек. Выявлена также тенденция увеличения диапазона вариаций осадков в бассейнах сибирских рек в XXI веке относительно XX века [27].

Вечная мерзлота

В КМ ИФА РАН оценивались также возможные изменения вечной мерзлоты при различных сценариях. Естественно, что пространственное

распределение вечной мерзлоты связано с особенностями распределения температуры, в частности температуры поверхности суши. Однако, согласно [59], при общем соответствии конфигураций изолиний температуры и границ криолитозон абсолютного совпадения нет. Так, в различных регионах Евразии границе сплошной мерзлоты соответствуют среднегодовая температура поверхности в диапазоне $-7 \pm 2^\circ\text{C}$ [59]. Поэтому при оценках климатических изменений на основе КМ ИФА РАН, наряду с простейшим предположением, что граница сплошной вечной мерзлоты соответствует среднему значению -7°C , использовался также индекс относительной суровости I_M [60]. Этот индекс оценивается по максимальному $T_{s, \max}$ и минимальному $T_{s, \min}$ значениям приповерхностной температуры, достигаемым в годовом ходе при сглаживании последнего (по среднемесячным данным, например). В случае, когда $T_{s, \min} < T_0 < T_{s, \max}$ (где $T_0 = 0^\circ\text{C}$) индекс относительной суровости определяется следующим образом:

$$I_M = (T_{s, \min} - T_0) / (T_{s, \max} - T_0).$$

При $T_{s, \min} < T_{s, \max} < T_0$ индексу I_M приписываются очень большие по величине отрицательные значения, а в случае $T_0 < T_{s, \min} < T_{s, \max}$ – наоборот, очень большие положительные значения. Граница сплошной вечной мерзлоты характеризовалась величиной $I_M = -2$ для квазистационарных условий, а прерывистой вечной мерзлоты – величиной $I_M = -1$ [24, 25, 29]. Стоит отметить, что индекс, используемый в [61], пересчитывается в индекс I_M , и в этом смысле они эквивалентны.

Проведен анализ площади суши СП $S_i(I_M)$, ограниченной изолинией определенного значения индекса I_M , в том числе $S_i(-2)$ – площади с температурными условиями, благоприятными для формирования сплошной вечной мерзлоты. На рис. 5 приведены изменения $S_i(-2)$ с 30-летним скользящим осреднением для периода 1900–2100 гг. с учетом Гренландии и без ее учета в КМ ИФА РАН

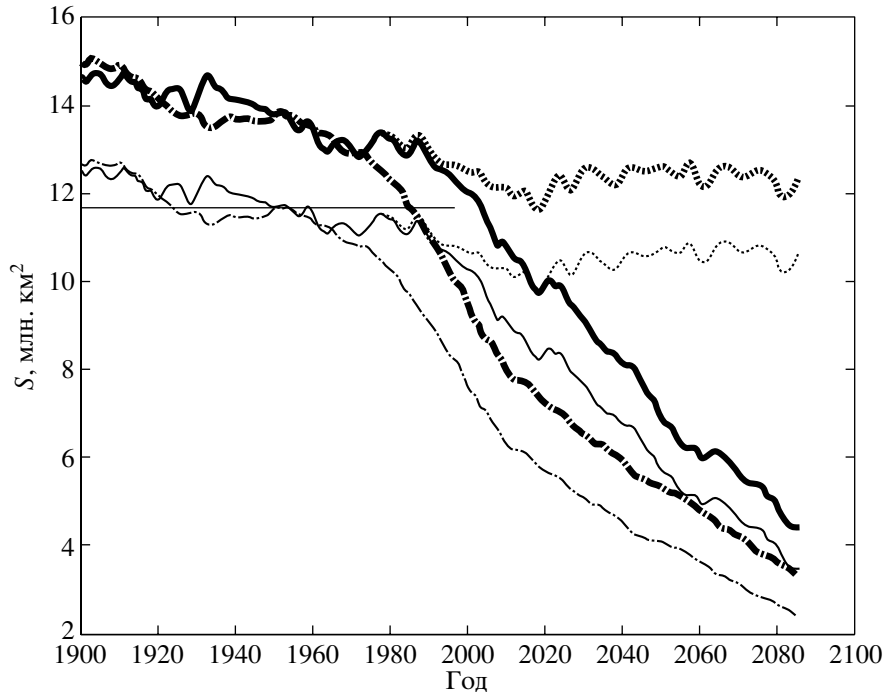


Рис. 5. Вариации площади с температурными условиями, благоприятными для образования сплошной вечной мерзлоты $S_i(-2)$ с 30-летним скользящим осреднением для периода 1900–2100 гг. с учетом Гренландии (жирные кривые) и без ее учета (тонкие кривые) в КМ ИФА РАН при сценариях I (сплошные кривые) и II (прерывистые кривые), а также в климатической модели общей циркуляции ECHAM4/OPYC3 (штрих-пунктир). Оценка по эмпирическим данным отмечена отрезком тонкой линии.

(сценарий I), а также в КМОЦ ECHAM4/OPYC3. Кроме того, приведены соответствующие изменения $S_i(-2)$ в КМ ИФА РАН при сценарии II и отмечено современное значение площади вечной мерзлоты по данным [61].

Из сопоставления кривых видно близкое соответствие временной эволюции $S_i(-2)$ для моделей ECHAM4/OPYC3 и КМ ИФА РАН. При этом значение условной площади сплошной вечной мерзлоты в КМ ИФА РАН без учета Гренландии для периода до начала резкого спада (приблизительно начало XXI века) практически совпадает с наблюдениями по данным [61]. Модель ECHAM4/OPYC3 воспроизводит близкие значения $S_i(-2)$ для прошлых лет, однако с более ранним резким уменьшением $S_i(-2)$ в конце XX века. Именно с этого момента обе модели показывают начало резкого спада $S_i(-2)$, так что к середине столетия эта площадь уменьшается более, чем наполовину (для ECHAM4/OPYC3 приблизительно на 2/3). Сравнение двух сценариев I и II позволяет оценить возможные изменения условий вечной мерзлоты в XXI веке для КМ ИФА РАН вследствие антропогенных воздействий после 1990 г.

На рис. 6 приведена зависимость площади с температурными условиями, благоприятными для существования сплошной вечной мерзлоты $S_{in}(-2)$, нормированной на среднее значение для базового периода 1961–1990 гг., от соответствующих вариаций

глобальной приповерхностной температуры δT_{gl} по расчетам КМ ИФА РАН при сценарии I (а), а также, для сравнения, для модели ECHAM4/OPYC3 при увеличении содержания парниковых газов в атмосфере по сценарию IS92a (б). Прямые на рис. 6 соответствуют линейным регрессиям, при этом коэффициенты линейной регрессии характеризуют температурную чувствительность площади $dS_{in}(-2)/dT_{gl}$. Модельные результаты сопоставляются с данными палеорекострукций для северной Евразии в оптимуме голоцена (6000 лет назад) и микулинского межледникового (125000 лет назад) [62].

Получены близкие оценки температурной чувствительности площади $S_{in}(-2)$ для климатических моделей. Так для периода 1900–2050 гг. температурная чувствительность площади вечной мерзлоты, нормированной на ее значение для базового периода 1961–1990 гг., получена для КМ ИФА РАН равной $-0.35 (\pm 0.04) ^\circ\text{C}^{-1}$ при коэффициенте корреляции между $S_{in}(-2)$ и T_{gl} , $r = -0.97$, а для ECHAM4/OPYC3 – соответственно $-0.35 (\pm 0.04) ^\circ\text{C}^{-1}$ при $r = -0.98$. При этом модельные оценки температурной чувствительности $S_{in}(-2)$ близки к оценкам по данным палеорекострукций для северной Евразии с уменьшением $S_i(-2)$ на четверть по сравнению с современной при увеличении средней глобальной температуры на 1°C в оптимуме голоцена [62]. Это соответствует чувствительно-

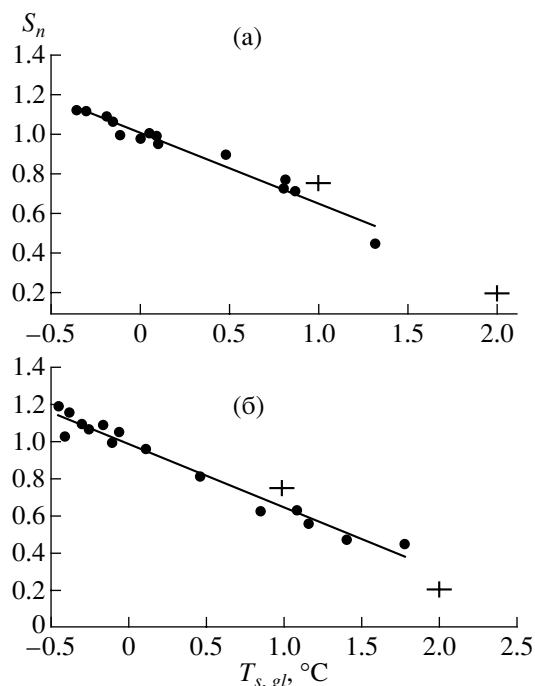


Рис. 6. Зависимость площади с температурными условиями, благоприятными для образования сплошной мерзлоты $S_{in}(-2)$, нормированной на среднее значение для базового периода 1961–1990 гг., от соответствующих вариаций глобальной приповерхностной температуры δT_{gl} по расчетам КМ ИФА РАН при сценарии I_M (а), а также, для сравнения, для модели ЕСНАМ4/ОРУС3 при увеличении содержания парниковых газов в атмосфере по сценарию IS92a (б). Прямые соответствуют линейным регрессиям.

сти $dS_{in}(-2)/dT_{gl} = 0.25^\circ\text{C}^{-1}$. Уменьшение же площади сплошной мерзлоты на 80% при изменении средней глобальной температуры на 2°C в микулинском межледниковье [62] соответствует $dS_{in}(-2)/dT_{gl} = 0.4^\circ\text{C}^{-1}$. Оценки температурной чувствительности $S_i(-2)$ по расчетам КМ ИФА РАН и ЕСНАМ4/ОРУС3 лежат в пределах диапазона палеооценок. Стоит отметить, что температурная чувствительность $S_{in}(-2)$ при учете эффектов изменения содержания сульфатного аэрозоля в атмосфере, в частности в ЕСНАМ4/ОРУС3, получена близкой к оцененной без этого учета [25].

На рис. 7 отмечены территории с температурными условиями, благоприятными для существования сплошной и прерывистой вечной мерзлоты в Евразии, границы которых характеризуются изолиниями $I_M = -2$ и $I_M = -1$, в КМ ИФА РАН для двух 30-летних интервалов: базового периода во второй половине XX века (1961–1990 гг.) (а) и в середине первой половины XXI века (2011–2040 гг.) при сценарии I (б) и II (в) антропогенных воздействий. В целом КМ ИФА РАН воспроизводит особенности пространственного распределения вечной мерзлоты в Восточной Сибири (рис. 7а). Заметные отличия выявлены, в частности, в рай-

оне Урала и северной части Европы, где КМ ИФА РАН завьшшает площадь мерзлоты. Изменения границ, оцениваемых индексами $I_M = -2$ и $I_M = -1$, в Восточной Сибири в первой половине XXI века (рис. 7б) по сравнению с XX веком (рис. 7а) в целом соответствуют изменениям в ЕСНАМ4/ОРУС3 [26, 29]. При сценарии II заметные отличия от сценария I для периода 2011–2040 гг. на рис. 7б,в получены как для условий сплошной мерзлоты, так и для прерывистой.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Анализ численных экспериментов показал способность КМ ИФА РАН в целом адекватно воспроизводить не только средние глобальные и региональные климатические характеристики, в том числе температурного, циркуляционного и гидрологического режима, но и характеристики климатической изменчивости.

В частности, в сравнении с эмпирическими данными для XIX–XX веков КМ ИФА РАН воспроизводит глобальный температурный режим в среднем, а диапазон межгодовой изменчивости (СКО) в климатической модели промежуточной сложности (КМПС) только на четверть больше, чем по эмпирическим данным. Более высокая межгодовая изменчивость глобальной температуры по сравнению с наблюдениями существенно связана с большей изменчивостью в СП.

Величина глобальных осадков в КМ ИФА РАН, а также отдельно над сушей и океаном, находится в диапазоне неопределенности эмпирических данных и результатов реанализа. Модельные оценки межгодовой изменчивости глобальных осадков в целом на уровне существующих оценок по разным эмпирическим данным. При этом следует отметить, что есть существенные различия данных, в частности для соотношения изменчивости осадков в разных регионах, в том числе над сушей и океаном в целом.

Проведенный анализ выявил хорошее воспроизведение в КМ ИФА РАН изменчивости индекса Северо-Атлантической осцилляции. При этом корреляция модельного и эмпирического индексов статистически значима только для последних трех десятилетий, тогда как для всего периода с середины XIX до конца XX века корреляция незначима. Отмечено увеличение квазидесятилетней цикличности САО в конце XX века при антропогенном сценарии изменения содержания парниковых газов в атмосфере.

В сравнении с эмпирическими данными для XIX–XX веков КМ ИФА РАН достаточно хорошо воспроизводит не только средний режим стока Волги, но и его межгодовую изменчивость в XX веке. Сравнительно хорошо оценивается в КМПС и средний режим стока крупнейших сибирских рек,

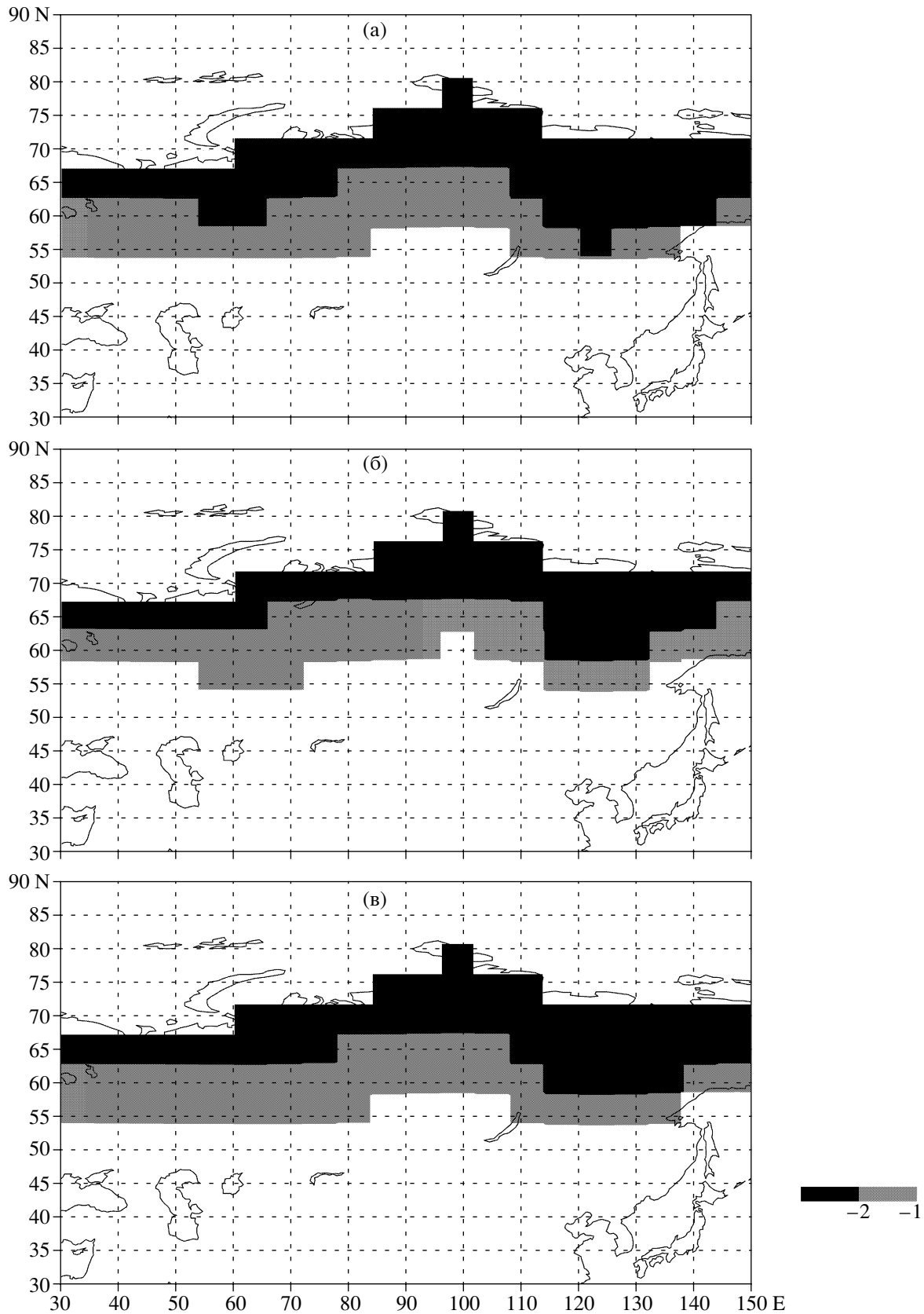


Рис. 7. Территории с температурными условиями, благоприятными для существования сплошной (более темная окраска) и прерывистой (более светлая окраска) вечной мерзлоты в Евразии с границами $I_M = -2$ и $I_M = -1$ в КМ ИФА РАН для двух 30-летних интервалов: базового периода во второй половине XX века (1961–1990 гг.) (а) и в середине первой половины XXI века (2011–2040 гг.) при сценариях I (б) и II (в) антропогенных воздействий.

за исключением Лены. При этом межгодовая изменчивость стока сибирских рек, оцениваемая разностью осадков и испарения в бассейнах, хорошо воспроизводится только для Лены, а для Оби и Енисея переоценивается.

Согласно проведенным расчетам, КМ ИФА РАН хорошо воспроизводит средний режим вечной мерзлоты в СП в целом. При этом КМПС в целом описывает особенности пространственного распределения территорий с условиями вечной мерзлоты, в частности в Восточной Сибири. В то же время выявлены и заметные региональные различия с эмпирическими данными, например завышение площади с условиями, благоприятными для существования вечной мерзлоты в модели для района Урала и северной части Европы.

Следует отметить, что уменьшение $S_i(-2)$ и $S_i(-1)$ не означает одновременное уменьшение площади вечной мерзлоты, так как изменения термического режима многолетних мерзлых грунтов запаздывают относительно изменений приповерхностного температурного режима. Характерное время установления вертикального профиля температуры многолетних мерзлых грунтов составляет от нескольких десятков до ста лет. Поэтому приведенные результаты по чувствительности площади вечной мерзлоты следует рассматривать как предельные оценки для квазистационарных условий, а при интерпретации временных зависимостей иметь ввиду отмеченную собственную инерционность мерзлых грунтов.

Полученные с использованием КМПС оценки возможных глобальных климатических изменений в XXI веке, в частности скорости антропогенного роста глобальной приповерхностной температуры и осадков, находятся в пределах неопределенности соответствующих оценок на основе различных детальных КМОЦ. При этом следует отметить, что полученная в КМПС скорость роста глобальных осадков в XXI веке находится вблизи верхней границы модельного диапазона неопределенности.

Наряду с этим сделаны оценки региональных изменений гидрологического режима, включая осадки и речной сток в бассейнах Каспийского моря и крупнейших сибирских рек. На фоне общего роста в XXI веке осадков в бассейнах и стока Волги, Оби, Енисея и Лены вследствие антропогенных воздействий отмечено увеличение диапазона вариаций региональных характеристик гидрологического цикла.

Согласно полученным результатам, средние значения индекса САО в КМ ИФА РАН при антропогенном сценарии продолжают расти в XXI веке. При этом они (и различия со сценарием с прекращением роста атмосферного содержания CO_2 с конца XX века) достигают уровня СКО межгодовой изменчивости XIX–XX веков к концу первой четверти XXI века.

Проведенное сравнение температурной чувствительности площади вечной мерзлоты в Северном полушарии в КМ ИФА РАН и КМОЦ показало,

что модели, удовлетворительно воспроизводящие современное значение площади сплошной мерзлоты, близки по ее чувствительности к увеличению глобальной приповерхностной температуры, а также близки к соответствующим оценкам по палеореконструкциям.

Проведенный анализ различных сценариев, в том числе при продолжающемся увеличении содержания углекислого газа в атмосфере в XXI веке и в случае прекращения роста в конце XX века, позволяет оценить возможные глобальные и региональные изменения вследствие антропогенных воздействий после 1990 г. с помощью КМ ИФА РАН.

Данная работа была выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты № 02-05-64573, 00-05-64606, 00-15-98498).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs et al. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. 881 p.
2. Jones P.D., New M., Parker D.E. et al. Surface air temperature and its changes over the past 150 years // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. P. 173–199.
3. Golitsyn G.S., Semenov A.I., Shefov N.N., Fishkova L.M., Lysenko E.V., Perov S.P. Long-term temperature trend in the middle and upper atmosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. № 14. P. 1741–1744.
4. Семенов А.И., Шефов Н.Н., Гившивили Г.В., Лещенко Л.Н., Лысенко Е.В., Русина В.Я., Фишкова Л.М., Марцваладзе Н.М., Торошелидзе Т.И., Каицеев Б.Л., Олейников А.Н. Сезонные особенности многолетних трендов температуры средней атмосферы // Докл. АН. 2000. Т. 374. № 6. С. 816–819.
5. Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P. 759–762.
6. Petoukhov V.K., Mokhov I.I., Eliseev A.V., Semenov V.A. The IAP RAS global climate model. M.: Dialogue-MSU, 1998. 110 p.
7. Handorf D., Petoukhov V.K., Dethloff K., Eliseev A.V., Weisheimer A., Mokhov I.I. Decadal climate variability in a coupled atmosphere-ocean climate model of moderate complexity // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D22. P. 27 253–27 275.
8. Мохов И.И., Елисеев А.В., Хандорф Д., Петухов В.К., Детлофф К., Вайсхаймер А., Хворостьянов Д.В. Северо-Атлантическое Колебание: диагноз и моделирование декадной изменчивости и ее долгопериодной эволюции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 5. С. 605–616.
9. 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.K., Stone P., Wang Z. Earth System Models of Intermediate Complexity: Closing the gap in the spectrum of climate system models // *Clim. Dyn.* 2002. V. 18. P. 579–586.
10. Dickinson R.E., Henderson-Sellers A., Kennedy P.J., Wilson M.F. Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model.

- NCAR/TN-275+STR. NCAR Tech. Note. Boulder, Colorado, 1986. 69 p.
11. Foukal P., Lean J. An empirical model of the total solar irradiance variation between 1874 and 1986 // *Science*. 1990. V. 247. P. 556–558.
 12. Hoyt D.V., Kyle H.I., Hickey J.R., Maschhoff R.H. The Nimbus-7 total irradiance: a new algorithm for its derivation // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 97. P. 5–63.
 13. Wilson R.C., Hudson H.S. The Sun's luminosity over a complete cycle // *Nature*. 1991. V. 351. P. 42–44.
 14. Berger A. Long term variations of daily insolation and Quaternary climate changes // *J. Atmos. Sci.* 1978. V. 35. P. 1476–1478.
 15. Lean J. Solar ultraviolet irradiance variations – a review // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92(D1). P. 839–868.
 16. Thompson L.G., Davis M.E., Mosley-Thompson E. Glacial records of global climate. A 1500-year tropical ice core record of climate // *Human Ecology*. 1994. V. 22. P. 83–95.
 17. Climate Change: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds: J.T. Houghton, B.A. Callander, S.K. Varney. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 198 p.
 18. Елисеев А.В., Мохов И.И., Петухов В.К. Моделирование квазидвухлетней цикличности температуры атмосферы и тенденции ее эволюции при климатических изменениях // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1997. Т. 33. № 6. С. 733–742.
 19. Мохов И.И., Петухов В.К., Семенов В.А. Внутрисезонные температурные режимы и их эволюция в трехмерной модели климата // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1998. Т. 34. № 2. С. 163–171.
 20. Mokhov I.I., Petukhov V.K., Eliseev A.V., Semenov V.A. Multiscale diagnostics of water and energy cycles in Asia (Siberia) from observations and model simulations // *Proceedings of the Second International Workshop on Energy and Water Cycle in GAME-Siberia*. 1998. Res. Rep. IHAS. No.4. Nagoya: Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences, Nagoya University. P. 91–98.
 21. Handorf D., Petoukhov V.K., Dethloff K., Eliseev A.V., Weisheimer A., Mokhov I.I. Climate variability at decadal and interdecadal time scales // *CLIVAR Exchanges*. 1999. V. 4. № 4. P. 21–24.
 22. Мохов И.И., Хон В.Ч. Диагностика и моделирование изменений гидрологического режима в бассейнах сибирских рек в XX и XXI веке // *Экология пойм сибирских рек и Арктики. Томск* “SST”, 2000. С. 8–16.
 23. Mokhov I.I., Dethloff K., Eliseev A.V., Handorf D., Khon V.Ch., Khvorostyanov D.V., Weisheimer A. Quasidecadal variations of North Atlantic and Arctic Oscillations from long-term integrations of climate model of intermediate complexity and observations // *AGU Chapman Conference “The North Atlantic Oscillation”*. Book of Abstracts. 2000. University of Vigo. Ourense.
 24. Demchenko P.F., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Impact of the greenhouse gases atmospheric loading on the continuous permafrost cover in the Northern Hemisphere // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. Ed. H. Ritchie. WMO/TD-No. 1064. 2001. P. 7.7–7.8.
 25. Demchenko P.F., Eliseev A.V., Mokhov I.I., Nechaev V.P., Velichko A.A. Sensitivity of permafrost cover in the Northern Hemisphere to climate change // *CLIVAR Exchanges*. 2001. V. 6. № 3. P. 9–11.
 26. Демченко П.Ф., Величко А.А., Голицын Г.С., Елисеев А.В., Нечаев В.П. Судьба вечной мерзлоты: взгляд из прошлого в будущее // *Природа*. 2001. № 11. С. 43–49.
 27. Mokhov I.I., Khon V.Ch. Water cycle in basins of Siberian rivers: changes in XIX–XXI centuries from model simulation // *Proc. Fifth Intern. Study Conf. on GEWEX in Asia and GAME*. Nagoya, 2001. V. 2. № 31(2). P. 328–333.
 28. Mokhov I.I., Khon V.Ch. Projections of future changes of hydrological cycle in the Caspian Sea basin // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. Ed. H. Ritchie. WMO/TD-No. 1064. 2001. P. 9.20–9.21.
 29. Демченко П.Ф., Величко А.А., Елисеев А.В., Мохов И.И., Нечаев В.П. Зависимость условий распространения вечной мерзлоты от уровня глобального потепления: сравнение моделей, сценариев и данных палеореконструкций // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2002. Т. 38. № 2. С. 165–174.
 30. Eliseev A.V., Mokhov I.I. Amplitude-phase characteristics of annual cycle of surface air temperature in Northern Hemisphere // *Advances Atmos. Sci.* 2002. (Submitted)
 31. Oberhuber J.M. The OPYC Ocean General Circulation Model // *Hamburg: Max-Planck-Institute for Meteorology*. 1993. Rep. № 7. 130 p.
 32. Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L., Christoph M., Claussen M., Duemenil L., Esch M., Giorgetta M., Schlese U., Schulzweida U. The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate. Hamburg: Max-Planck-Institute for Meteorology, 1996. Rep. № 218. 90 p.
 33. Collins M., Tett S.F.B., Cooper C. The internal climate variability of HadCM3, a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments // *Clim. Dyn.* 2001. V. 17. P. 61–81.
 34. Williams K.D., Senior C.A., Mitchell J.F.B. Transient climate change in the Hadley Centre models: The role of physical processes // *J. Climate*. 2001. V. 14. № 12. P. 2659–2674.
 35. Sellers W.D. *Physical climatology*. Univ. of Chicago, 1965. 272 p.
 36. Baumgartner A., Reichel E. *The world water balance*. Amsterdam: Elsevier, 1975. 179p.
 37. Jaeger L. *Monatskarten des Niederschlags fuer die ganze Erde* // *Ber. Dt. Wetterd.* 1976. V. 18. № 139. 38 p.
 38. Будыко М.И. *Климат в прошлом и будущем*. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 351 с.
 39. Peixoto J.P., Oort A.H. *Physics of climate*. New York, NY: American Institute of Physics, 1992. 520 pp.
 40. Xie P., Arkin P.A. Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1997. V. 78. P. 2539–2558.
 41. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. // *Bull. Amer. Met. Soc.* 1996. V. 77. P. 437–471.
 42. Hurrell J.W., van Loon H. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation // *Climatic Change*. 1997. V. 36. P. 301–326.

43. CLIVAR Initial Implementation Plan. WCRP. WCRP No.103. WMO/TD No.869. ICPO No.14. 1998. 314 p.
44. *Thompson D.W., Wallace J.M.* The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 9. P. 1297–1300.
45. *Mokhov I.I.* Climate changes: Analysis of global cycles // *Ann. Geophys.* 1993. V. 11. Suppl. II. P. C334.
46. *Мохов И.И., Елисеев А.В.* Тенденции изменения характеристик квазидвухлетней цикличности зонального ветра и температуры приэкваториальной нижней стратосферы // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 1998. Т. 34. № 3. С. 327–336.
47. *Golitsyn G.S., Meleshko V.P., Mescherskaya A.V., Mokhov I.I., Pavlova T.V., Galin V.A., Senatorsky A.O.* GCM simulation of water balance over Caspian Sea and its watershed // *Proc. First International AMIP Scientific Conference (Monterey, California, USA, 15–19 May 1995).* WMO/TD–№ 732. 1995. P. 113–118.
48. *Арпе К., Бенгтссон Л., Голицын Г.С., Мохов И.И., Семёнов В.А., Спорышев П.В.* Анализ и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря // *Доклады РАН.* 1999. Т. 366. № 2. С. 248–252.
49. *Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G.S., Mokhov I.I., Semenov V.A., Sporyshev P.V.* Connection between Caspian Sea level variability and ENSO // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. № 17. P. 2693–2696.
50. *Mokhov I.I., Petukhov V.K., Senatorsky A.O.* Sensitivity of storm track activity and blockings to global climatic changes: Diagnostics and modelling. *Publ. Acad. Finland.* 1995. 6/95. P. 438–441.
51. *Mokhov I.I., Semenov V.A.* Cyclonic activity and hydrological cycle over Caspian Sea region // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling.* H. Ritchie (ed.). WMO/TD-No.792. 1997. P. 2.35–2.36.
52. *Hydrology and Water Resources.* Ed: N. Arnell et al. // *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.* Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary et al. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. P. 191–233.
53. *Захаров В.Ф.* Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 213 с.
54. *Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли /* Под ред. В.И. Корзуна и др. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 638 с.
55. Global Runoff Data Centre. Second Interim report on the Arctic river database for Arctic Climate System Study (ACSYS). Tech. Rep. 12. FIH. Koblenz, 1996. 48 p.
56. *Duemenil-Gates L., Hagemann S., Golz C.* Observed historical discharge data from major rivers for climate model validation. Hamburg: Max-Planck-Institut fuer Meteorologie, 2000. Rep. № 307. 93 p.
57. *Shea D.* Climatological Atlas: 1950–1979, surface air temperature, precipitation, sea-level pressure and sea-surface temperature (45S–90N). NCAR. TN-269+STR. Boulder, CO. 1986.
58. *Vuglinsky V.S.* River water inflow to the Arctic Ocean – conditions of formation, time variability and forecasts // *Proc. of the ACSYS conference on polar processes and global climate (Rosario, Orcas Island, WA, USA, 3–6 November 1997).* WCRP-106. WMO/TD № 908. 1998. P. 277–278.
59. *Гаврилова М.К.* Современный климат и вечная мерзлота на континентах. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1981. 113 с.
60. *Нечаев В.П.* О некоторых соотношениях между мерзлотными и климатическими параметрами и их палеогеографическое значение // *Вопросы палеогеографии плейстоцена ледниковых и перигляциальных областей /* Величко А.А., Гричук В.П. М.: Наука, 1981. С. 211–220.
61. *Анисимов О.А., Нельсон Ф.Е.* Влияние изменения климата на вечную мерзлоту в Северном полушарии // *Метеорология и гидрология.* 1996. № 5. С. 71–80.
62. *Величко А.А., Нечаев В.П.* К оценке динамики вечной мерзлоты северной Евразии в условиях глобального изменения климата // *Доклады РАН.* 1992. Т. 324. № 3. С. 667–671.

Estimations of Global and Regional Climate Changes during the 19th–21st Centuries on the Basis of the IAP RAS Model with Consideration for Anthropogenic Forcing

I. I. Mokhov, P. F. Demchenko, A. V. Eliseev, V. Ch. Khon, and D. V. Khvorost'yanov

Oboukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per. 3, Moscow, 109017 Russia

Abstract—Possible global and regional climate changes during the 21st century are analyzed on the basis of the calculations with the IAP RAS climate model (CM) of intermediate complexity under different scenarios of anthropogenic forcings. Under one of the scenarios, the CO₂ content in the atmosphere was specified for the 1860–1990 period according to observational data and for the 1991–2100 period according to the IS92a scenario. Under the other scenario, the CO₂ content was also specified according to the observational data for the 1860–1990 period and did not vary after 1990. Possible variations in global surface air temperature and precipitation and also in the characteristics of atmospheric circulation, in particular, the North-Atlantic and Arctic oscillations, were estimated. Estimates were also obtained for the regional changes in the hydrological regime, including the precipitation and runoff in the basins of the Volga and Caspian Sea and major Siberian rivers, such as Ob, Yenisei, and Lena, and for the boundaries of the areas whose conditions favor the formation of both continuous and discontinuous permafrost, for example in Eurasia. Comparison of climate changes obtained with the IAP RAS CM under different scenarios allows one to estimate the possible global and regional changes due to the anthropogenic forcings after 1990.