

## Достоверность прогноза будущих изменений климата

*Е.М. Володин*

Одним из главных вопросов, возникающих при рассмотрении результатов моделирования будущих изменений климата, является вопрос о том, насколько достоверны эти результаты, то есть насколько действительные изменения климата будут соответствовать результатам модели. Исчерпывающий ответ на этот вопрос дать невозможно, пока непосредственные наблюдения за климатом не покажут, насколько был справедлив прогноз. Тем не менее, оценить достоверность прогноза будущих изменений климата хотелось бы уже сейчас. Судить о достоверности прогнозов можно по тому, как модель воспроизводит современный климат, а также его изменения за последнее столетие. Кроме того, прогноз будущих изменений климата может быть получен, если есть прогноз внешних воздействий, благодаря которым климат будет меняться. Как известно, основным воздействием, определяющим изменения климата в ближайшее столетие, считается увеличение концентрации парниковых газов вследствие деятельности человека, прежде всего углекислого газа. Поэтому прогноз климата зависит от того, как будет расти концентрация этих газов. Это, в свою очередь, зависит, прежде всего, от того, сколько ископаемого топлива будет сожжено в результате деятельности человека. Согласно оценкам межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) при различных сценариях развития человечества будет сожжено от 1.0 до 2.5 тысяч Гт топлива в пересчете на углерод. Напомним, что все разведанные запасы ископаемого топлива оцениваются в 5 тысяч Гт углерода. Поэтому при моделировании изменений климата необходимо рассматривать как минимум несколько сценариев изменения концентрации парниковых и других газов. В данной работе рассматриваются три сценария: А2, А1В, В1 для которых к 2100г. будет сожжено соответственно 1.9, 1.6 и 1.0 тысяч Гт углерода. Однако, одного знания о выбросах углекислого газа недостаточно для того, чтобы знать его концентрацию в атмосфере, поскольку значительную часть выбросов поглощает океан и экосистемы суши. Это поглощение зависит в том числе от самого климата и его изменений. Поэтому концентрация углекислого газа по заданному сценарию эмиссии углекислого газа определяется лишь приближенно. Согласно последнему сравнению моделей климата и углеродного цикла, опубликованному в 4 отчете МГЭИК, в котором участвовало 10 моделей, при сценарии А1В к 2100г. от 41% до 72% эмиссии остается в атмосфере, остальная часть поглощается океаном и экосистемами суши. Такая неопределенность является еще одним источником неопределенности всего прогноза. Источники и стоки остальных парниковых газов, например, метана, известны еще хуже, и относительная неопределенность прогноза концентрации этих газов еще больше.

Кроме того, даже если сценарий изменения концентрации парниковых и других газов известен точно, различные модели дают различный прогноз изменений климата при его использовании. Поэтому при составлении прогноза изменений климата используют данные ансамбля моделей, для чего проводят международные сравнения этих моделей. Последнее такое сравнение проходило в 2004-2005г.г. В нем участвовало около 20 моделей. Результаты сравнения описаны в готовящемся на момент написания работы 4-м отчете МГЭИК, из которого взяты представленные в данной работе рисунки, показывающие данные моделей, участвующих в сравнении. С данными всех моделей сравниваются данные модели ИВМ.

Стандартным тестом для определения чувствительности моделей климата является расчет с удвоенной концентрацией  $\text{CO}_2$  по сравнению с современной, или с доиндустриальной. При этом, возможны два варианта проведения эксперимента: в первом расчет проводится достаточно долго, до достижения квазиравновесного отклика. Во втором случае ищется нестационарный отклик на удвоение  $\text{CO}_2$ , когда концентрация  $\text{CO}_2$  растет со скоростью 1% в год и достигает удвоения через 70 лет. На рис.1 приведен стационарный и нестационарный отклик моделей, участвовавших в сравнении, на удвоение содержания  $\text{CO}_2$  для глобально осредненной приземной температуры воздуха. Стационарный отклик составляет от 1.8 до 4.5 градуса. Нестационарный отклик благодаря термической реакции океана меньше и

изменяется от 1.4 до 2.8 градуса. Для модели ИВМ стационарный отклик равен 2.1 градуса, а нестационарный 1.6 градуса, то есть чувствительность модели ИВМ к удвоению концентрации CO<sub>2</sub> несколько меньше среднего по всем моделям, но не выходит за рамки межмодельной изменчивости.

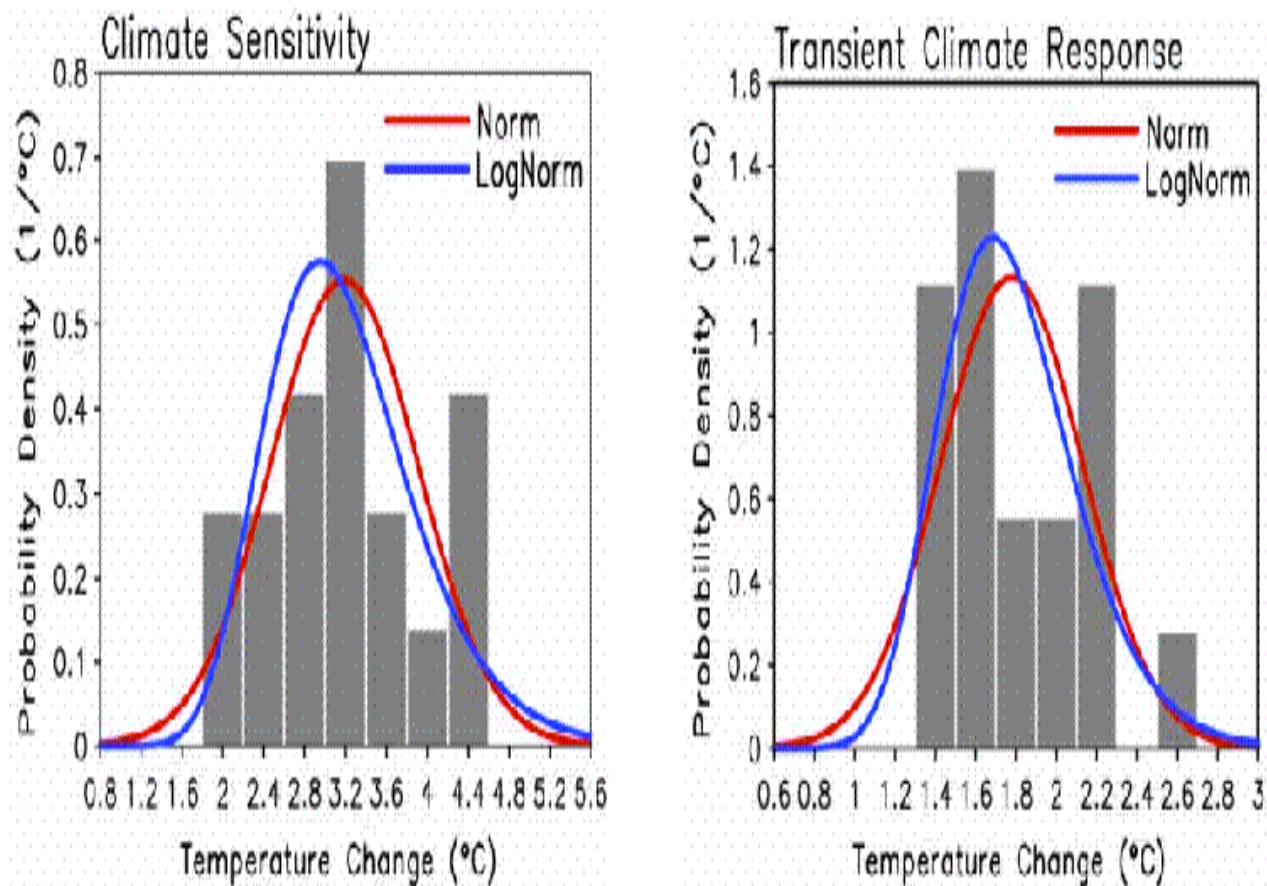


Рис.1. Функция распределения изменения температуры приземного воздуха для стационарного (слева) и нестационарного (справа) отклика на удвоение содержания CO<sub>2</sub>. Красной и синей линией нарисованы нормальное и логнормальное распределения с таким же средним и дисперсией.

Основной причиной различия между моделями является различная реакция облачности на глобальное потепление. Модели, где количество облаков при глобальном потеплении уменьшается, предсказывают потепление большее, чем модели, в которых количество облаков увеличивается. Изменение облаков принято характеризовать изменением их радиационного форсинга на верхней границе атмосферы, то есть изменением радиационного баланса из-за изменения облачности при всех прочих неизменных параметрах атмосферы. Изменение радиационно-облачного форсинга в 2080-2099г.г. по сравнению с 1980-1999г.г. при сценарии A1B для различных моделей представлено на рис.2. В 11 моделях изменение радиационно-облачного форсинга при глобальном потеплении отрицательно, а в 5 положительно. В модели ИВМ изменение радиационно-облачного форсинга составляет  $-1.3 \text{ Вт/м}^2$ , что несколько меньше среднего по всем моделям. Именно поэтому стационарная чувствительность модели ИВМ к удвоению CO<sub>2</sub> несколько меньше средней по всем моделям.

Сравним воспроизведение изменения глобально осредненной температуры в 20 столетии с наблюдаемой температурой, а также с данными других моделей (рис.3 и 4)



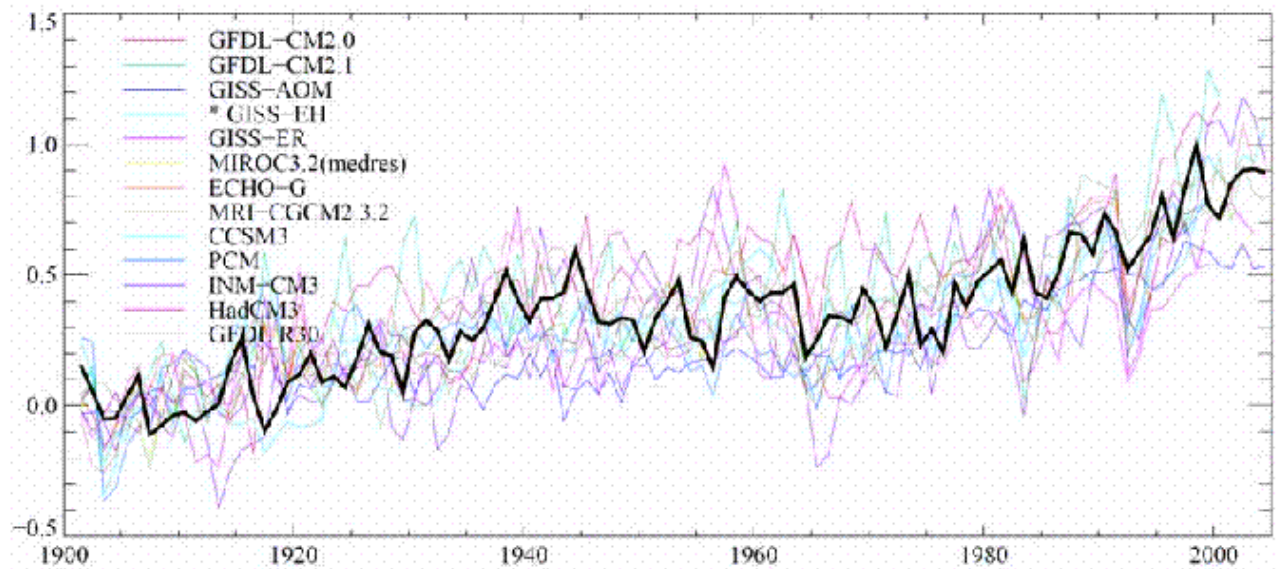


Рис.3. Временной ход аномалий глобально осредненной температуры (градусы) в 1900-2000г.г. по данным наблюдений (черная жирная линия) и данным моделей (цветные линии).

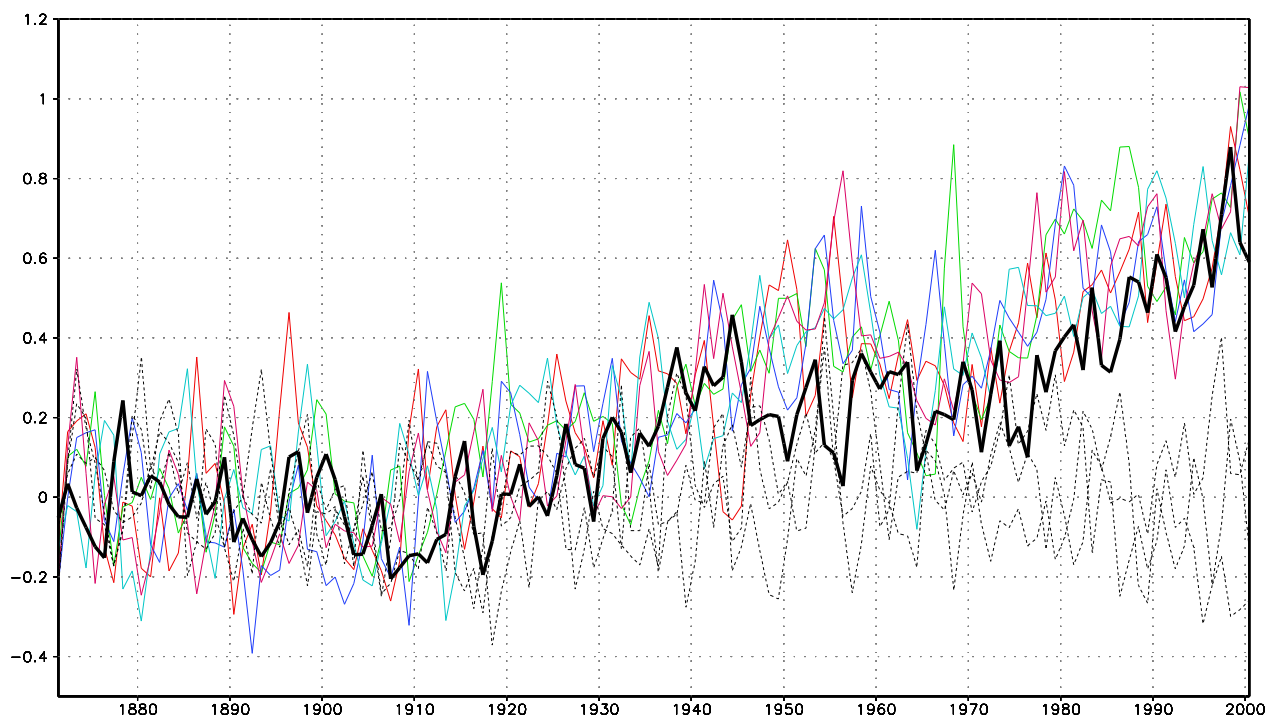


Рис.4. Временной ход аномалий глобально осредненной температуры в 1871-2000г.г. по данным наблюдений (черная жирная линия), по данным модели ИВМ с наблюдаемым изменением внешних воздействий (цветные линии) и по данным модели ИВМ с внешними воздействиями, фиксированными на уровне 1871г. (черные пунктирные линии).

Наблюдаемое потепление в 20 столетии составляет около 0.7 градуса. По данным моделей, потепление к 2000г. составляет от 0.5 до 1.0 градуса. В большинстве моделей получаются и

такие особенности, как более теплые 40-е и 50-е годы 20 столетия и замедление потепления в 60-е и 70-е годы. Данные ансамбля из 5 расчетов по модели ИВМ показывают, что моделируемое потепление к 2000г. составляет от 0.7 до 1.0 градуса, что соответствует наблюдаемому или чуть больше его. Для сравнения приведены результаты трех расчетов с концентрацией всех радиационно активных газов на уровне 1871г. Сколь-нибудь значимый тренд температуры в этих экспериментах отсутствует. В модели ИВМ также получаются потепление в 40-е и 50-е годы и замедление потепления в 60-е годы 20 столетия. Таким образом, временной ход глобально осредненной температуры в 20 столетии в модели ИВМ близок к наблюдаемому и к данным большинства моделей.

Сравним прогнозы изменения глобально осредненной температуры и осадков при различных сценариях для всех моделей и для модели ИВМ (рис.5 и 6).

Согласно рисункам, к 2100г. при сценарии А2 потепление составит от 2.3 до 3.9 градуса. Среднее по всем моделям потепление составляет около 3.4 градуса, что близко к потеплению, предсказанному с помощью модели ИВМ (3.5 градуса). Для сценария А1В величина потепления варьируется от 1.9 до более чем 4 градусов. Среднее по всем моделям потепление составляет около 2.7 градуса, для модели ИВМ эта величина составляет 2.6 градуса. При сценарии В1 потепление для всех моделей варьируется от 1.0 до 3.3 градуса. Средняя величина по всем моделям составляет 1.8 градуса, а для модели ИВМ потепление составляет 2.0 градуса. Таким образом, потепление, предсказываемое моделью ИВМ, оказывается близким к усредненному по всем моделям.

Кажущееся противоречие с тем, что чувствительность модели ИВМ к удвоению  $\text{CO}_2$  меньше средней, разрешается тем, что кроме парниковых газов, в сценариях заданы концентрации сульфатного аэрозоля, непрямого эффект которых (то есть влияние на облачность) в модели ИВМ не учтен, что увеличивает величину глобального потепления. Особенно хорошо это заметно в первой половине 21 столетия, когда, согласно сценариям, концентрация сульфатного аэрозоля достигает максимума. В эти годы отклонение температуры от 1980-1999г.г. в модели ИВМ одно из самых больших среди всех моделей. Другой причиной более сильного потепления в модели ИВМ, чем можно было бы ожидать из стационарной чувствительности к удвоению содержания  $\text{CO}_2$ , может быть несколько меньший прогрев океана при глобальном потеплении в модели ИВМ, чем в среднем по всем моделям. Это будет показано при рассмотрении повышения уровня океана.

При глобальном потеплении во всех моделях происходит также увеличение количества осадков. Для сценария А2 увеличение составляет к 2100г. 2-8%, среднее по всем моделям около 5%, в модели ИВМ увеличение осадков составляет около 6%. При сценарии А1В в моделях увеличение осадков составляет 1.5-7%, среднее по всем моделям составляет около 4.3%, в модели ИВМ увеличение составляет около 4.7%. При сценарии В1 увеличение осадков составляет 1.5-5.5%, среднее по всем моделям около 3%, в модели ИВМ увеличение осадков составляет 3.5%. Таким образом, для всех сценариев увеличение количества осадков в модели ИВМ немного превышает среднее по всем моделям, но укладывается в разброс по всем остальным моделям.

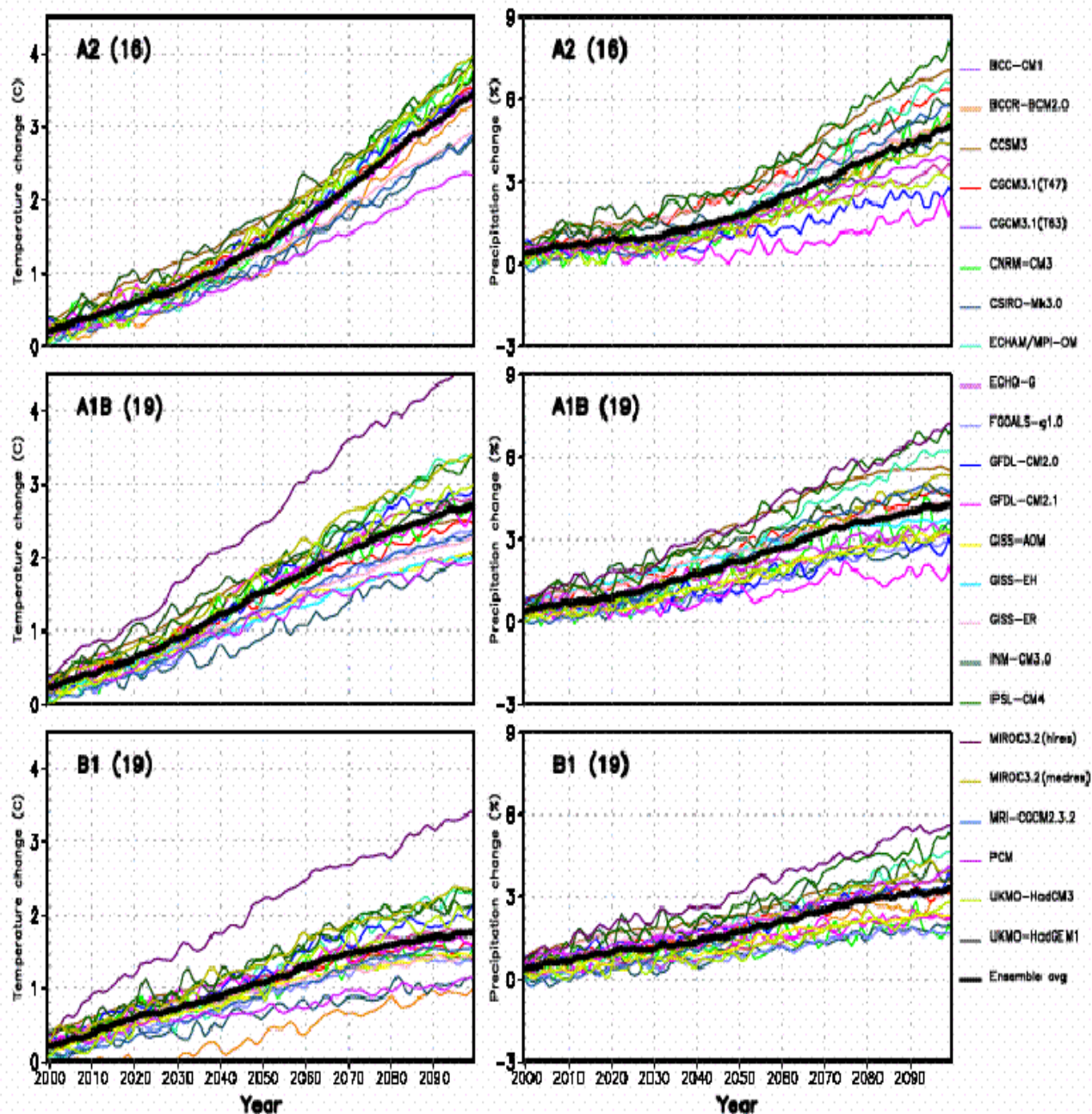


Рис.5. Отклонение глобально осредненной температуры приземного воздуха, градусы (слева) и осадков, проценты (справа) для сценариев A2 (вверху), A1B (в середине) и B1 (внизу) в 2000-2100г.г. по сравнению с 1980-1999г.г. для всех моделей, участвующих в сравнении.

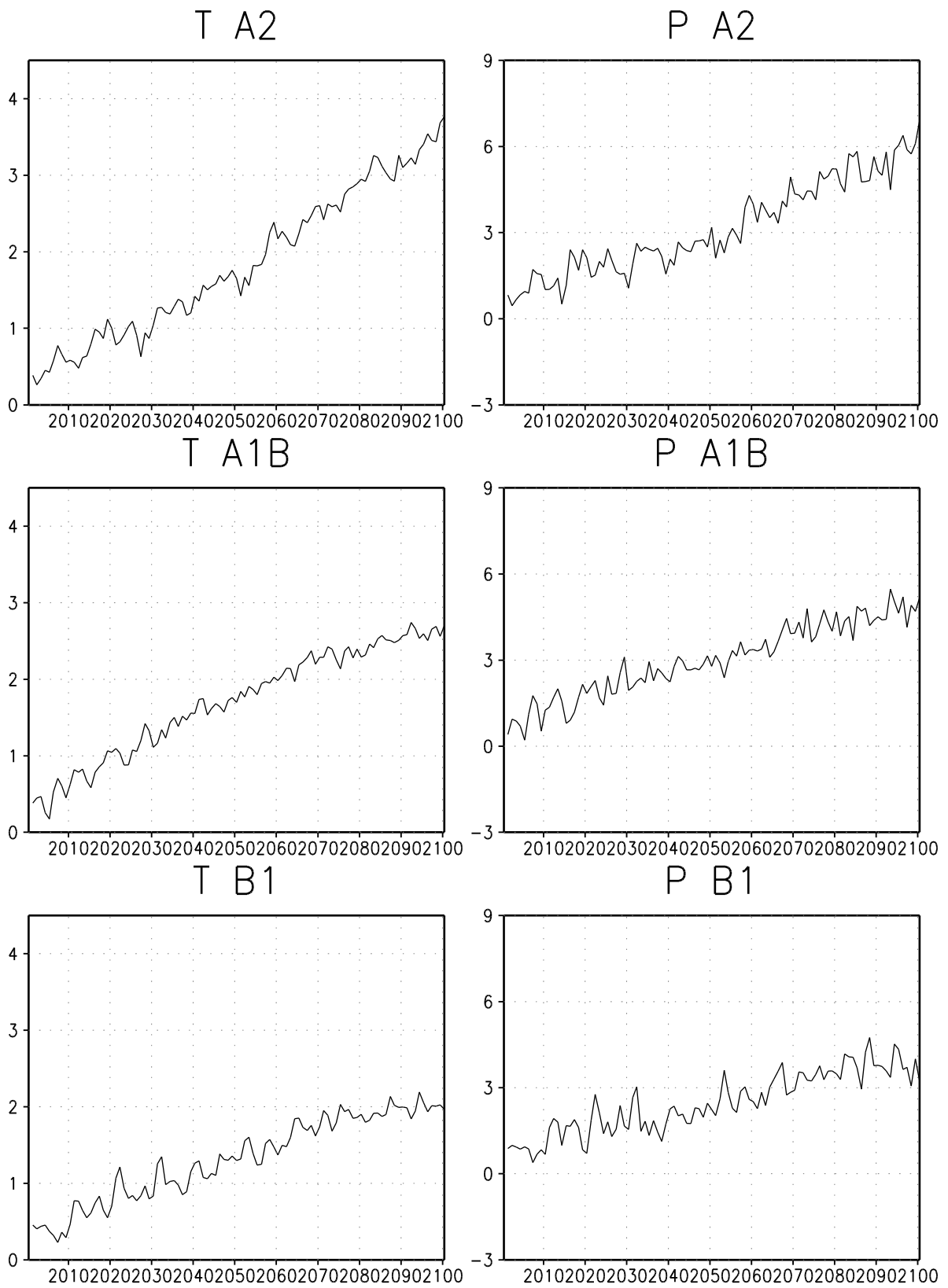


Рис.6. Отклонение глобально осредненной температуры приземного воздуха, градусы (слева) и осадков, проценты (справа) для сценариев A2 (вверху), A1B (в середине) и B1 (внизу) в 2000-2100г.г. по сравнению с 1980-1999г.г. для модели ИВМ.

Рассмотрим географическое распределение изменений климата при глобальном потеплении в модели ИВМ и в других моделях. На рис.7 изображено изменение осадков, почвенной влаги, речного стока и испарения в 2080-2099г.г. при сценарии А1В по сравнению с 1980-1999г.г. Данные осреднены по всем 19 моделям, участвовавшим в сравнении. На рис.8 приведены такие же данные для модели ИВМ. В целом, имеется неплохое согласие, как качественное, так и количественное, между данными всех моделей и результатами модели ИВМ. При глобальном потеплении, как по данным всех моделей, так и согласно модели ИВМ, происходит увеличение количества осадков в умеренных и высоких широтах обоих полушарий на 0.2-0.4 мм/сут., и уменьшение осадков во многих субтропических районах, в том числе вблизи Средиземного моря. Увеличивается количество осадков вблизи Экватора, особенно над большей частью Индийского и Тихого океанов. Над тропической Атлантикой и центральной Америкой количество осадков уменьшается. Эти изменения осадков определяют изменения речного стока. Речной сток увеличивается в умеренных и высоких широтах Евразии и Северной Америки и уменьшается в центральной Америке и окрестностях Средиземного моря, как по данным всех моделей, так и по данным модели ИВМ. Различия проявляются в юго-восточной Азии, где по данным всех моделей происходит увеличение речного стока, а по данным модели ИВМ – некоторое уменьшение.

Испарение при глобальном потеплении возрастает на большей части океанов, за исключением района к югу от Гренландии, окрестностей Антарктиды и некоторых других районов, как по данным всех моделей, так и по данным модели ИВМ. На суше испарение увеличивается в умеренных широтах Евразии и Северной Америки. Изменение почвенной влаги положительно в некоторых районах умеренных широт Евразии и Северной Америки, а также в окрестностях Экватора. На остальной части континентов изменение влаги в почве близко к нулю или отрицательно, как по данным всех моделей, так и по данным модели ИВМ. Таким образом, как уже говорилось, результаты модели ИВМ во многом соответствуют результатам, усредненным по всем моделям, участвующим в сравнении.



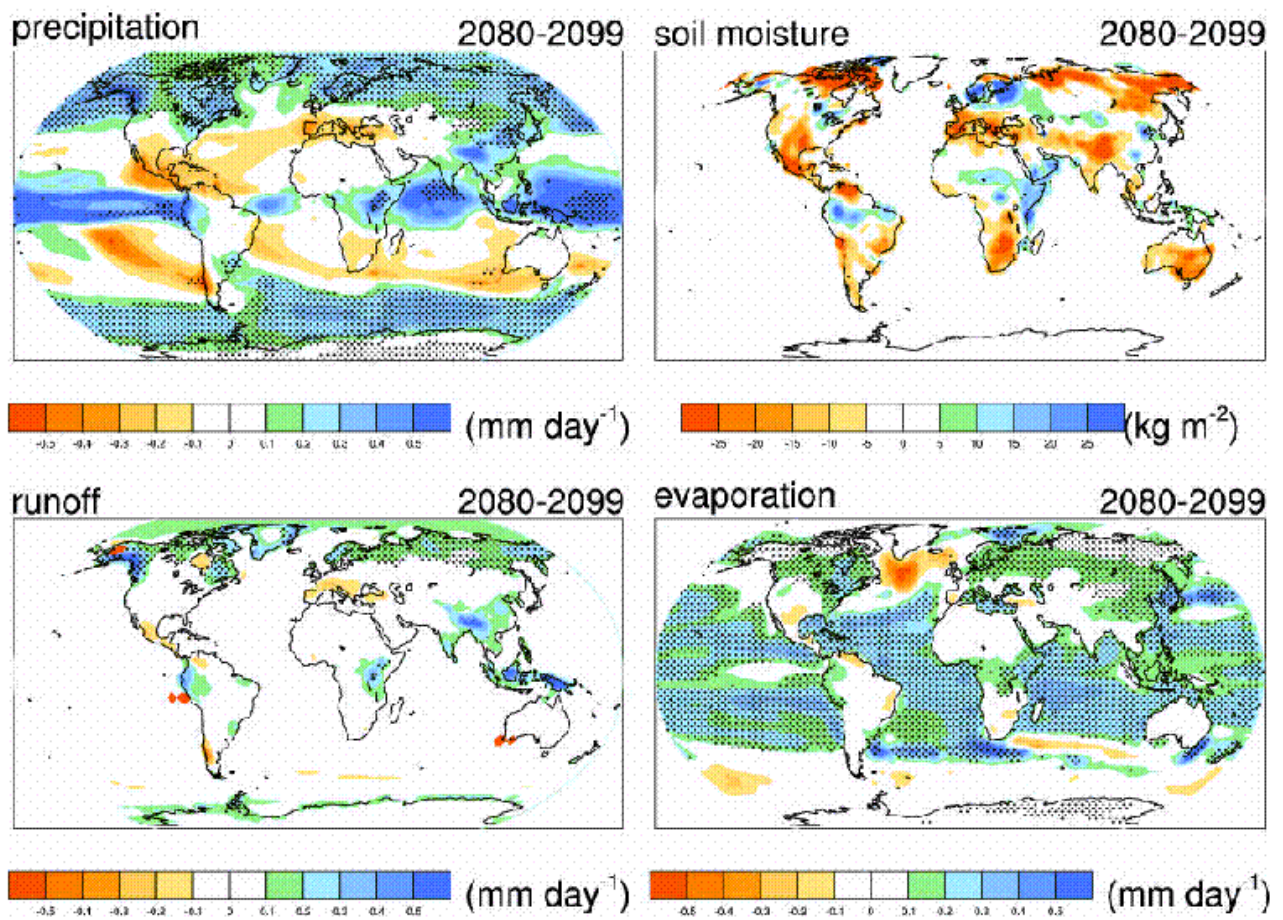


Рис.7. Разность осадков, мм/сут (слева сверху), почвенной влаги в верхнем метровом слое,  $\text{kg/m}^2$  (справа сверху), речного стока, мм/сут (слева внизу) и испарения, мм/сут (справа внизу) в 2080-2099г.г. при сценарии A1B по сравнению с 1980-1999г.г. по данным всех моделей.

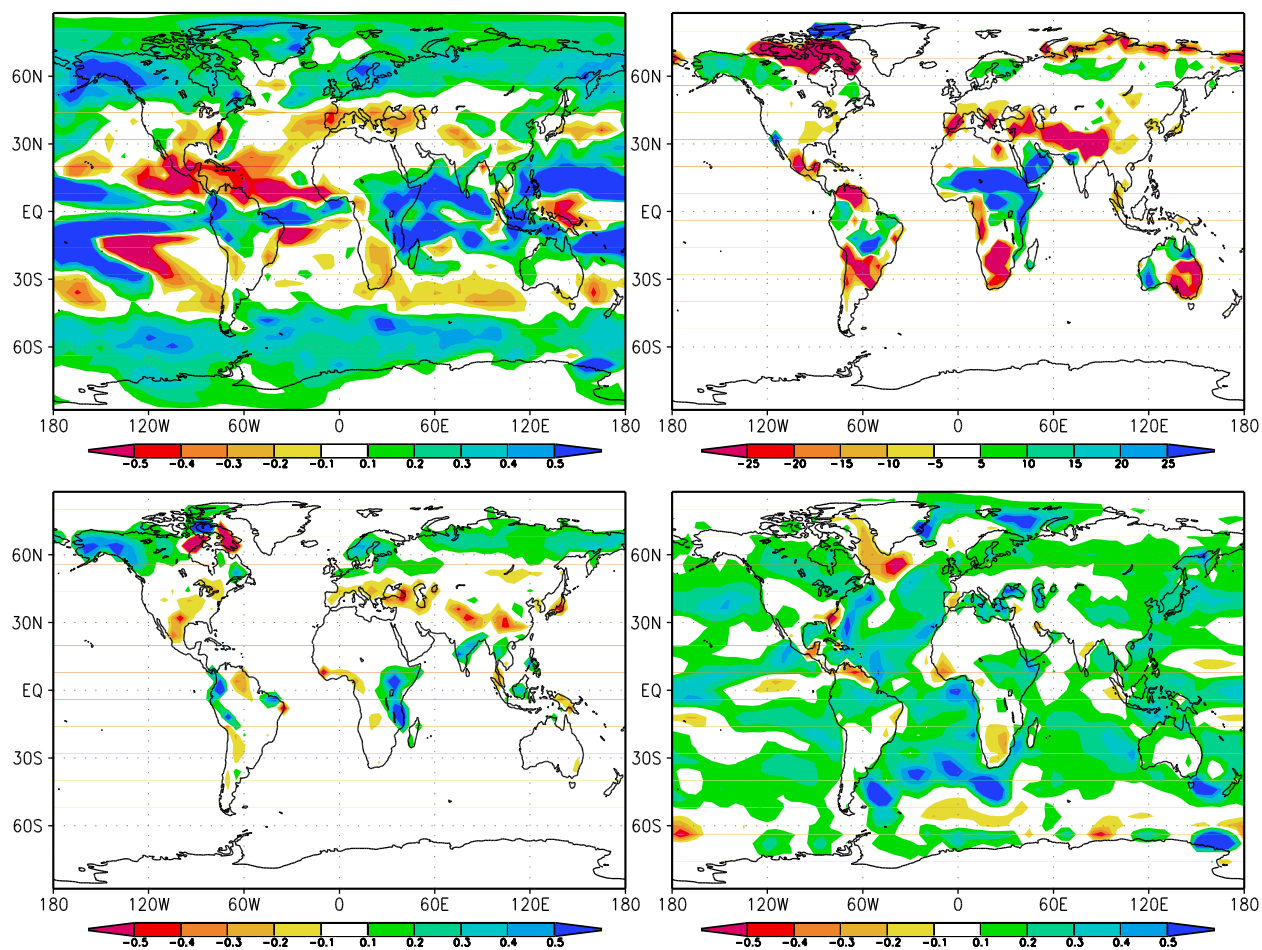


Рис.8. Разность осадков, мм/сут (слева сверху), почвенной влаги в верхнем метровом слое, кг/м<sup>2</sup> (справа сверху), речного стока, мм/сут (слева внизу) и испарения, мм/сут (справа внизу) в 2080-2099г.г. при сценарии А1В по сравнению с 1980-1999г.г. по данным модели ИВМ.

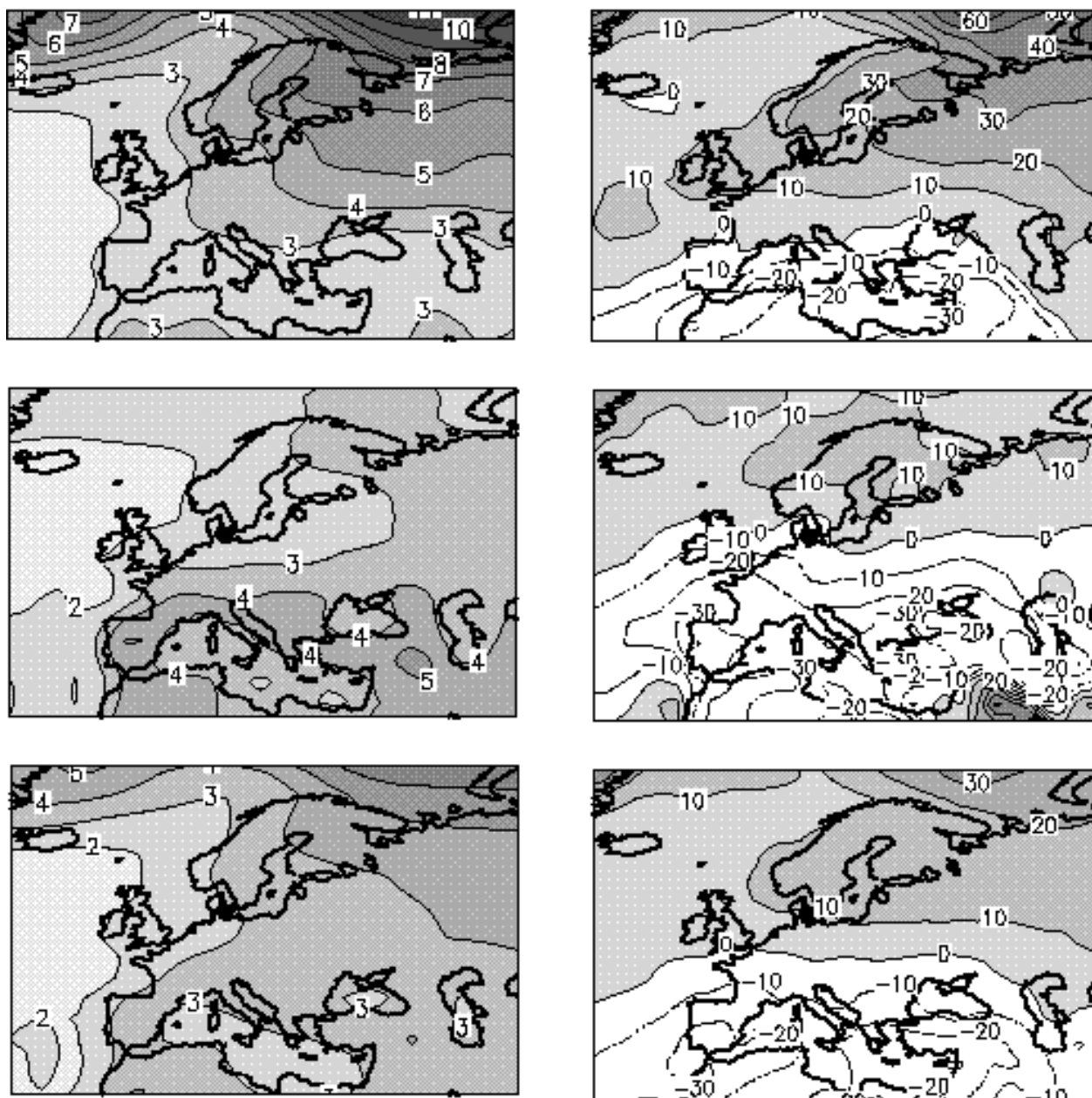


Рис.9. Изменение температуры воздуха у поверхности, градусы (слева) и осадков, проценты (справа) в Европе 2080-2099г.г. при сценарии А1В по сравнению с 1980-1999г.г., осредненные по всем моделям в декабре-феврале (вверху), июне-августе (в середине) и среднегодовые (внизу).

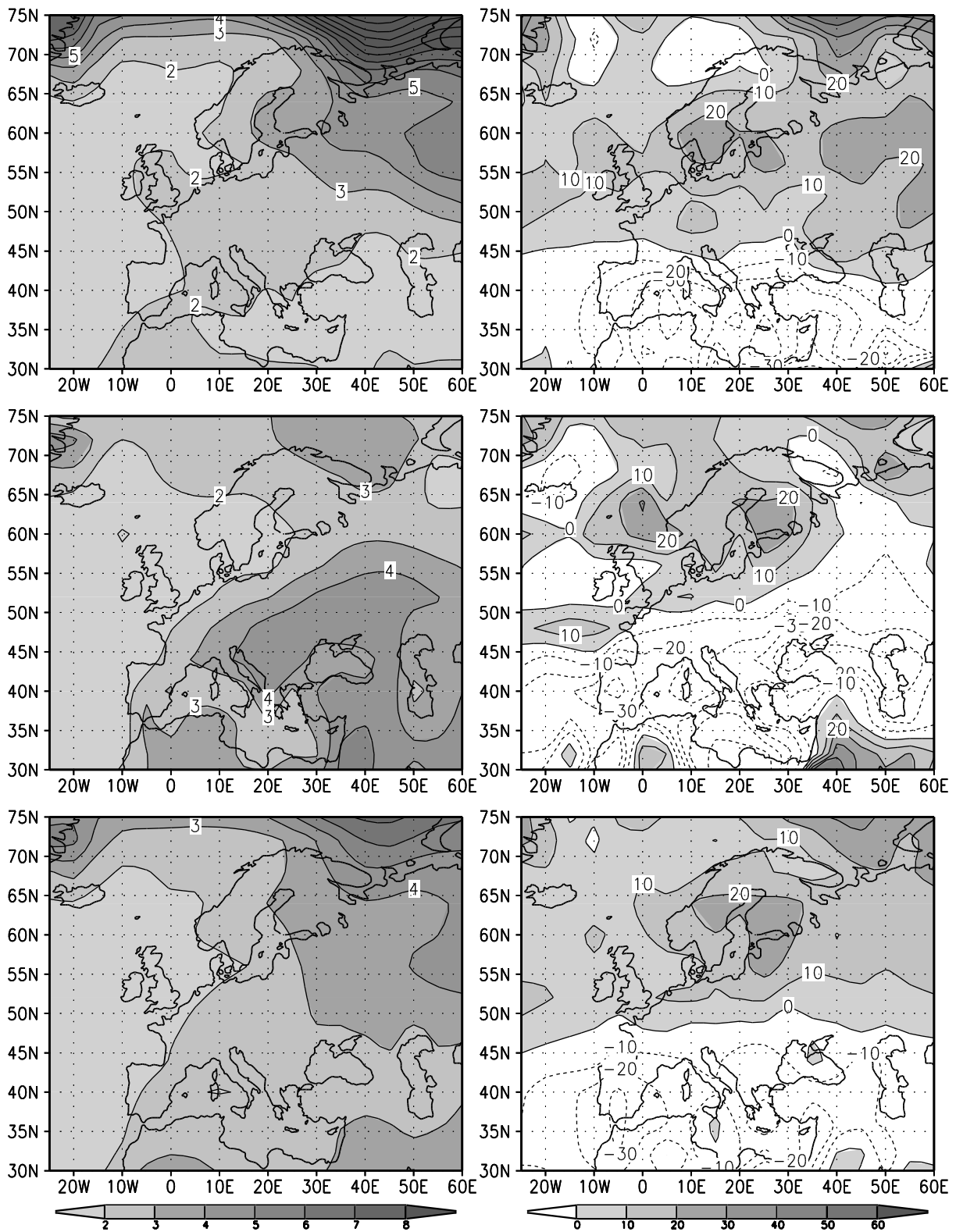


Рис.10. Изменение температуры воздуха у поверхности, градусы (слева) и осадков, проценты (справа) в Европе 2080-2099г.г. при сценарии А1В по сравнению с 1980-1999г.г. в модели ИВМ в декабре-феврале (вверху), июне-августе (в середине) и среднегодовые (внизу).

Рассмотрим, насколько близки региональные изменения температуры и осадков при глобальном потеплении в модели ИВМ и при усреднении по всем моделям, на примере

изменения климата в Европе (рис.9 и 10). Зимой в рассматриваемом регионе теплеет сильнее всего над Арктикой, где повышение температуры превосходит 10 градусов, как по данным всех моделей, так и в модели ИВМ. В субтропиках потепление минимально и составляет около 3 градусов по данным всех моделей, и 2-3 градуса по данным модели ИВМ. В центральных районах Европейской России потепление по данным модели ИВМ составляет в основном 3-5 градусов, а по данным всех моделей 4-6 градусов.

Летом потепление максимально в субтропиках и составляет там 4-5 градусов, как по усредненным данным, так и по данным модели ИВМ. Меньше всего потепление выражено над Атлантикой (около 2 градусов в обоих случаях), а также на севере рассматриваемой территории (около 3 градусов). В центре Европейской России потепление летом составляет около 3 градусов по усредненным данным и 3-4 градуса по данным модели ИВМ.

Изменение осадков по усредненным данным положительно в северной половине территории и достигает зимой 20-40%, а летом 10-20%. Уменьшение осадков наиболее заметно в окрестностях Средиземного моря, где оно достигает 30%. Граница между увеличением и уменьшением осадков по усредненным данным проходит зимой вблизи 45N, а летом вблизи 50N. Все перечисленные особенности изменения осадков в основном характерны и для данных модели ИВМ. Отличия между усредненными данными и данными модели ИВМ наиболее существенны летом на востоке Европейской России, где по данным модели ИВМ происходит небольшое уменьшение осадков, а по усредненным данным – небольшое увеличение.

Сравним изменение площади морского льда в 2080-2099г.г. при сценарии А1В по отношению к 1980-1999г.г. по данным всех моделей и модели ИВМ (рис.11 и 12). Не вдаваясь в анализ воспроизведения моделью современного наблюдаемого состояния льда, отметим, что наиболее существенные изменения площади морского льда при глобальном потеплении происходят летом в Арктике, где площадь льда уменьшается в несколько раз, как по данным всех моделей, так и по данным модели ИВМ. В Антарктике, а также в Арктике зимой, уменьшение льда при глобальном потеплении не столь существенно.

На рис.13 приведено изменение уровня океана вследствие термического расширения воды. В 20 столетии повышение уровня океана в моделях составляло от 0 до 8 см., в модели ИВМ оно было равно 4 см. Как следует из 4 отчета МГЭИК, наблюдавшееся повышение уровня океана в 20 столетии составляло 10-15 см., причем более половины этого повышения обусловлено термическим расширением воды. Следовательно, в среднем модели, по-видимому, несколько занижают повышение уровня океана вследствие термического расширения. При развитии глобального потепления в моделях происходит дальнейшее повышение уровня океана. Причем, разброс между моделями для одного сценария больше, чем разброс между средними по всем моделям для трех рассматриваемых сценариев. Так, для сценария А2 повышение уровня к 2100г. меняется в моделях от 15 до 36 см., при сценарии А1В – от 12 до 36 см., при сценарии В1 – от 9 до 26 см. Для модели ИВМ эти величины составляют соответственно 19, 17 и 15 см., то есть данные модели ИВМ находятся в нижней части интервала межмодельной изменчивости. Это означает, что, вероятно, эффективный слой океана, который успевает прогреться в модели ИВМ при глобальном потеплении, несколько тоньше, чем в среднем по моделям, однако и он не выходит за рамки межмодельной изменчивости. Это может быть дополнительной причиной того, что нестационарный отклик модели ИВМ на увеличение концентрации парниковых газов близок к среднему по всем моделям, в то время как стационарный отклик меньше среднего.

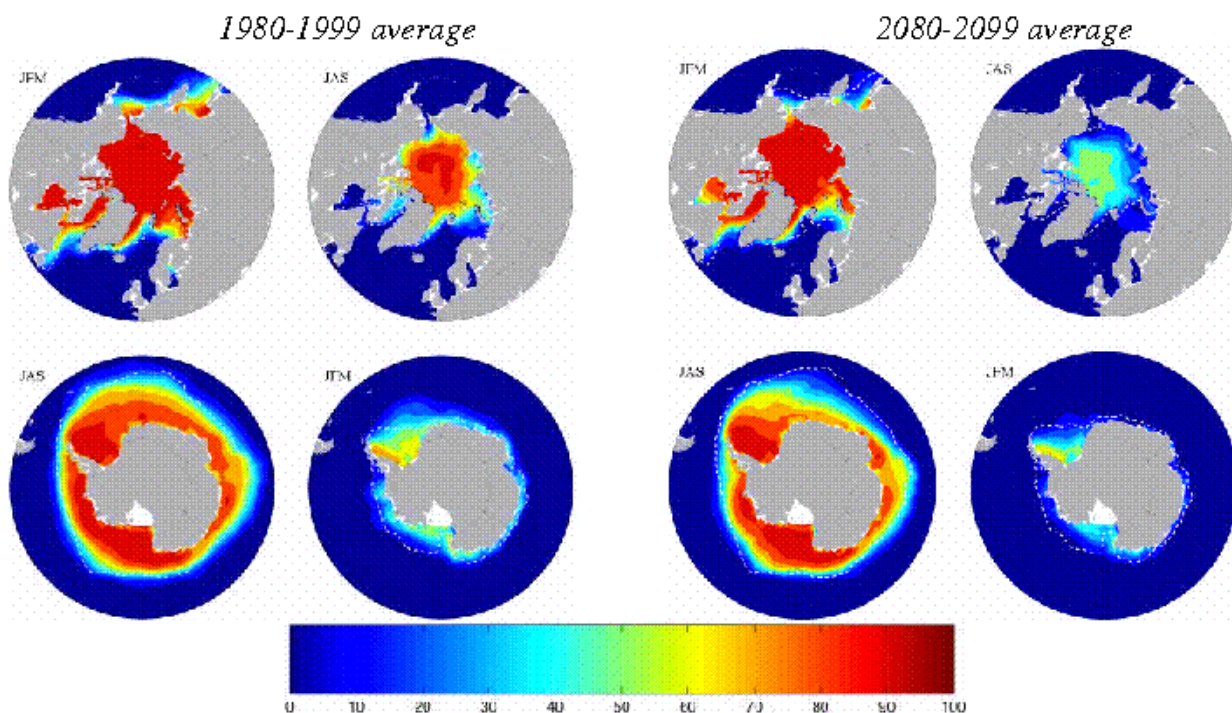


Рис.11. Сплоченность морского льда (%) в Арктике и Антарктике по данным, усредненным по всем моделям, в январе-марте и июле-сентябре 1980-1999г.г. и 2080-2099г.г.

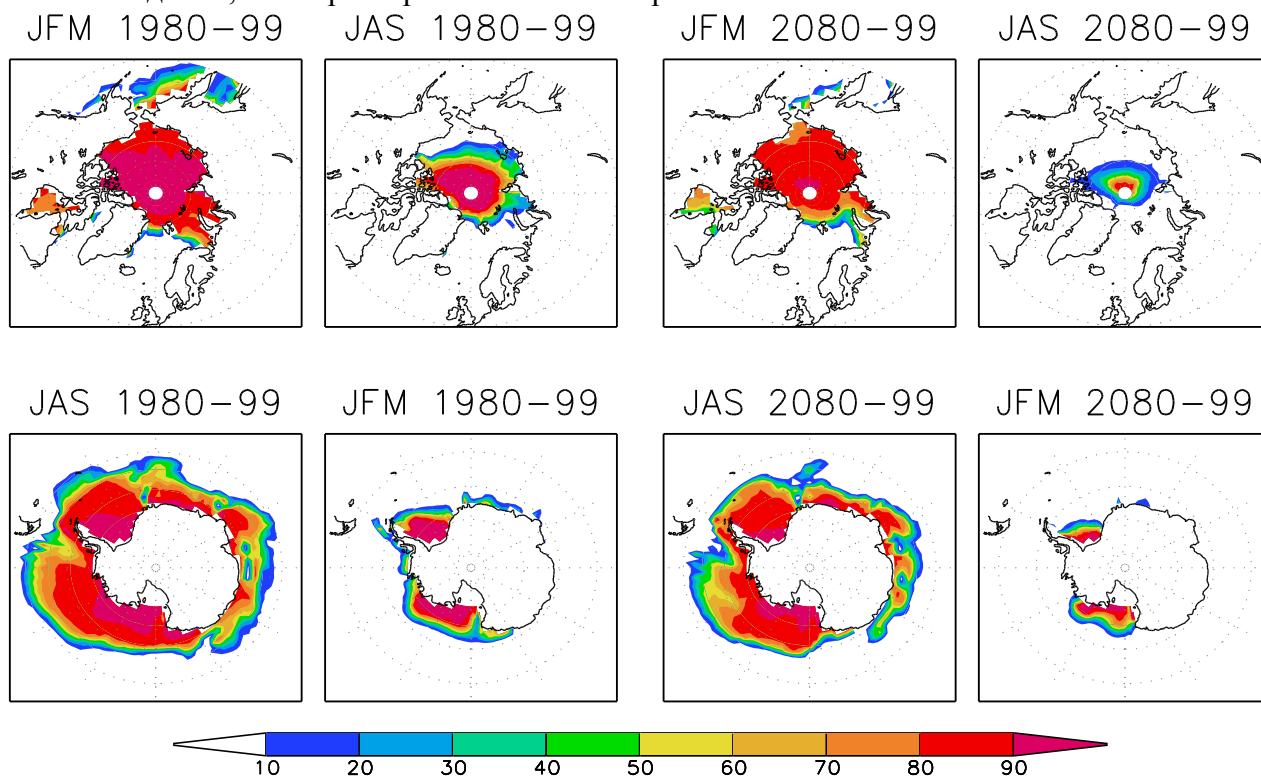


Рис.12. Сплоченность морского льда (%) в Арктике и Антарктике по данным модели ИВМ в январе-марте и июле-сентябре 1980-1999г.г. и 2080-2099г.г.

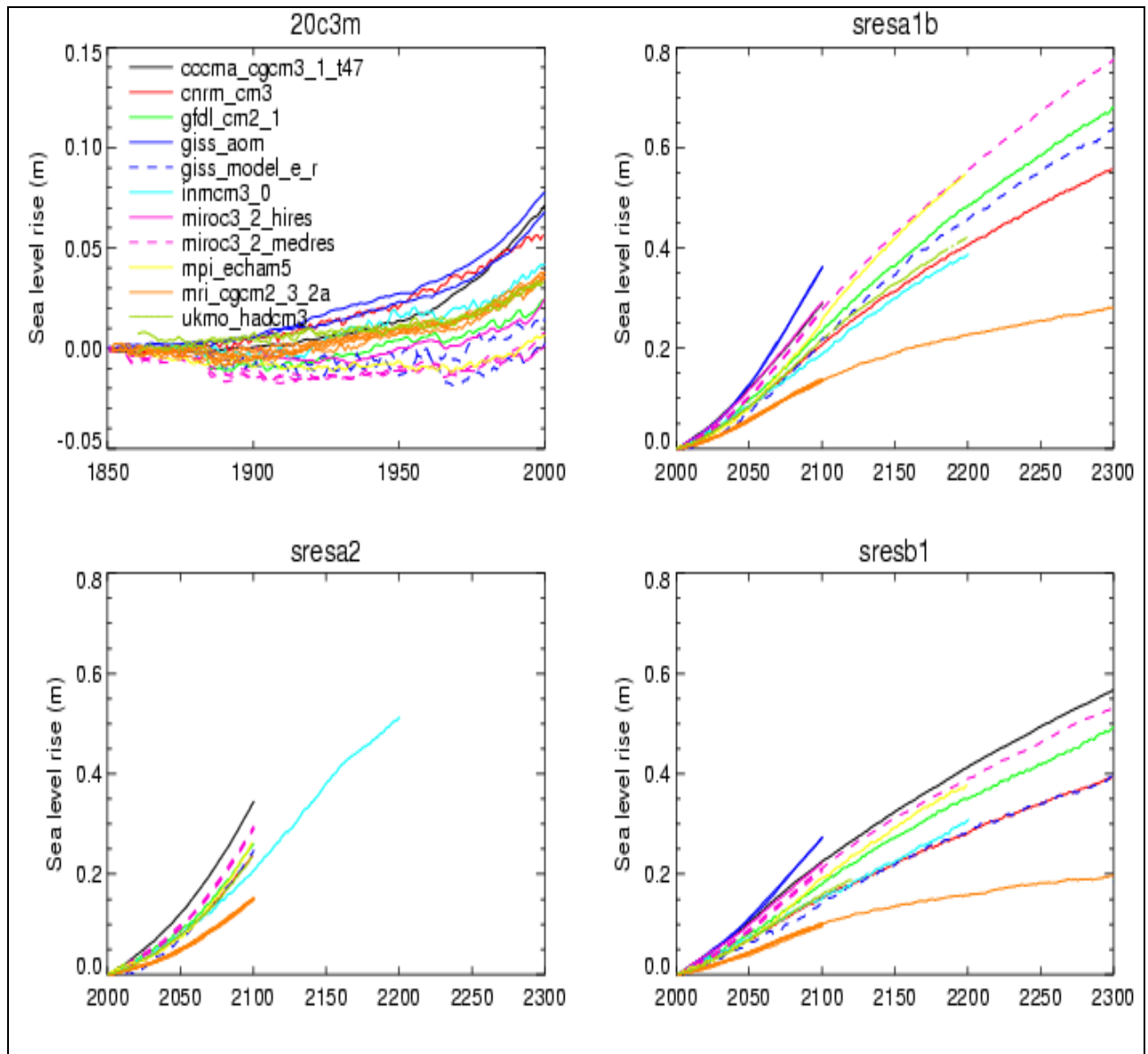


Рис.13. Изменение уровня океана (м) в моделях в эксперименте XX (слева сверху), A1B (справа сверху), A2 (слева внизу) и B1 (справа внизу).

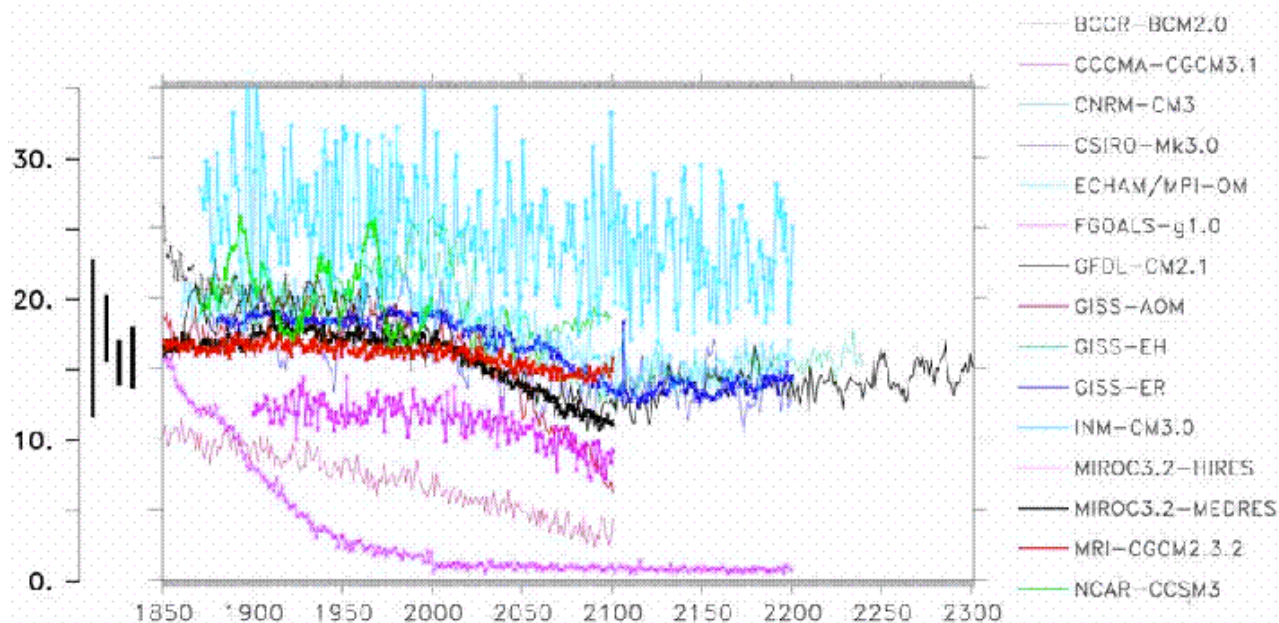


Рис.14. Временной ход величины меридиональной функции тока в Атлантике (Св) на широте 30N по данным моделей в эксперименте XX и А1В. Черные отрезки слева обозначают оценки по данным наблюдений в конце 20 столетия.

На рис.14 представлен временной ход максимума меридиональной функции тока в Атлантике в 1850-2300г.г. по данным моделей. Во всех моделях происходит уменьшение меридиональной циркуляции в Атлантике, обусловленное уменьшением конвекции в северной Атлантике вследствие повышения температуры и распреснения. Это уменьшение в 2100г. по сравнению с 1900г. составляет для всех моделей кроме одной от 2 до 10 Св. В модели ИВМ уменьшение меридиональной циркуляции составляет около 5 Св. Однако, данные модели ИВМ выделяются среди данных остальных моделей, во-первых, тем, что средняя величина меридиональной функции тока самая большая среди моделей и в 1.5-2 раза превышает оценки по данным наблюдений. Это происходит, по-видимому, из-за завышенной коррекции потока пресной воды в Гренландско-Норвежском море. Во-вторых, межгодовая изменчивость с характерным временем несколько лет в модели ИВМ самая большая среди всех моделей, по непонятным пока причинам.

Таким образом, в целом можно заключить, что результаты моделирования изменений климата в 21-22 столетиях по данным модели ИВМ по большинству показателей не очень далеки от среднего, полученного по всем моделям, участвовавшим в сравнении. Это позволяет заключить, что уровень прогноза будущих изменений климата, полученных с помощью модели ИВМ, соответствует современному уровню развития науки о климате. Однако, сделать однозначный вывод о том, в какой мере прогноз, сделанный по модели, будет соответствовать реальным изменениям климата, сделать невозможно, как из-за причин, обсуждавшихся в начале данной работы, так и из-за того, что на будущие изменения климата могут действовать другие, неизвестные пока факторы.