

---

Международная школа молодых ученых  
«Вычислительно-информационные технологии для наук об окружающей среде:  
CITES – 2003», Томск, 1-7 сентября 2003 г.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА

## Лекция 3. Воспроизведение современного климата

---

В.Н. Лыкосов

Институт вычислительной математики РАН,

119991, Москва, ГСП-1, ул. Губкина, 8

e-mail: [lykossov@inm.ras.ru](mailto:lykossov@inm.ras.ru)

# Ретроспективный обзор

- Исторически математическое моделирование в приложении к климатической системе началось с постановки и решения задачи о гидродинамическом численном прогнозе погоды.
- Эта задача была одной из самых важных областей применения первой вычислительной машины, созданной под руководством Дж. фон Неймана.
- По своей сути, прогноз погоды есть решение наиболее точным образом задачи Коши на конечном промежутке времени  $T$ .
- Можно выделить три категории прогнозов в зависимости от их заблаговременности  $T$  (Бенгтсон, 1988):
- 1) краткосрочный (до 3 дней) прогноз, который определяется главным образом исходным состоянием атмосферы (начальными условиями);
- 2) среднесрочный (до двух недель) прогноз, при котором требуется как детальная информация об исходных полях метеорологических элементов, так и адекватное описание воздействий внешних факторов («граничных условий») и
- 3) долгосрочный (до сезона) прогноз, который в большей степени зависит от краевых, чем от начальных условий, и включает в себя элементы моделирования климата.

# Прогноз погоды как задача физики

- Впервые проблема прогноза погоды как задача математики и механики была сформулирована в опубликованной в 1904 г. статье Вильгельма Бьеркнеса (Монин, 1969), в которой эта проблема рассматривалась как задача с начальными условиями для уравнений гидромеханики бароклиной жидкости.
- В начале 20-х годов XX-го столетия Льюисом Ричардсоном была предложена методология численного прогноза погоды (Richardson, 1922). При построении теории численного прогноза погоды Ричардсон внес большой вклад в исследования турбулентности пограничного слоя атмосферы, радиационных процессов и термодинамики атмосферы.
- Однако, попытка практического прогноза на один день (на 20 мая 1910 г. для района Нюрнберг-Аугсбург, Германия) численным методом (с помощью существовавших тогда вычислительных средств типа логарифмических линеек и механических калькуляторов) не удалась: рассчитанное приземное давление выросло за 6 часов на 145 гПа, что в 50 раз превысило наблюдавшуюся тенденцию (Hunt, 1998).
- Это было связано с тем, что: 1) в качестве начальных условий были использованы лишь наземные данные небольшой сети метеорологических станций в Европе); 2) использованный Ричардсоном конечно-разностный метод оказался вычислительно неустойчивым (критерий Куранта-Фридрихса-Леви для соотношения пространственного и временного шагов был установлен позже, в 1928 г.);
- 3) уравнения гидродинамики атмосферы, использованные в прогностической схеме, наряду с относительно медленными движениями, ответственными за синоптические процессы, описывали также всевозможные «шумы» типа акустических и гравитационных волн.

# Систематические ошибки

- Предложенный И.А. Кибелем (1940) фундаментальный принцип упрощения уравнений гидродинамики атмосферы (асимптотическое «квазигеострофическое разложение») позволил разработать процедуру фильтрации из решений уравнений несущественных для погоды метеорологических шумов и послужил основой для создания гидродинамической теории краткосрочных прогнозов погоды (Обухов, 1949, Кибель, 1957).
- Успехи вычислительной математики и появление электронно-вычислительных машин позволили в начале 50-х годов XX-го века осуществить (Charney et al., 1950) первый “практический” численный прогноз погоды (была использована модель, основанная на баротропном уравнении вихря).
- В настоящее время для целей прогнозирования погоды используются фактически те же модели, что и для воспроизведения климата. Надежно установлено, что предвычисление отдельных особенностей погоды возможно лишь на сравнительно небольшие сроки (до двух недель), что обусловлено ограниченной предсказуемостью атмосферных процессов.
- Большое значение имеет анализ так называемых систематических ошибок прогностической модели (Бенгтсон, 1988), которые выявляются (месячным) осреднением большого числа прогнозов при их сравнении с фактически наблюдавшимися распределениями метеорологических характеристик.
- Эти ошибки растут по мере увеличения заблаговременности и оказываются аналогичными ошибкам воспроизведения климата данной моделью. Таким образом, совершенствование климатических моделей (наряду с развитием технологий подготовки начальных данных) существенным образом определяет прогресс в прогнозировании погоды.

# Международные программы сравнения моделей

- В 1956 году опубликованы результаты первого численного эксперимента по воспроизведению общей циркуляции атмосферы с помощью двухслойной, квазигеострофической, полусферной модели (Phillips, 1956)
- В начале 60-х годов появилась первая 9-уровневая модель, основанная на полных (неупрощенных) уравнениях (Smagorinsky et al., 1963).
- В 1969 г. были опубликованы (Manabe & Bryan, 1969) результаты численных экспериментов с первой совместной моделью общей циркуляции атмосферы и океана.
- В России разработка гидродинамических климатических моделей началась в 70-х годах (Марчук и др., 1975, Зилитинкевич и др., 1976, Марчук и др., 1980).
- В настоящее время процесс создания глобальных климатических моделей происходит повсеместно. Этот “параллелизм” необходим для контроля воспроизводимости получаемых с их помощью результатов.
- В рамках международных программ AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project), CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) и др., описание и результаты которых можно найти в Интернете (см. <http://www-pcmdi.llnl.gov>), проводится целенаправленное сравнение моделей, разработанных различными группами исследователей в разных странах мира, как между собой, так и с данными наблюдений.
- Это дает возможность исследовать систематические ошибки в воспроизведении современного климата и оценить диапазон возможных его изменений, обусловленных, например, антропогенными воздействиями.

# Данные наблюдений, используемые при верификации моделей

- 1) реанализы Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (Великобритания) ERA-15 (1979-1993 г.г.) и ERA-40 (1957-2001 г.г.), информация о которых содержится по Интернет-адресу <http://www.ecmwf.int/research/era>;
- 2) реанализы NCEP/NCAR (Национальный центр охраны окружающей среды/Национальный центр атмосферных исследований, США) за период 1958-1997 г.г. (<http://wesley.web.noaa.gov/reanalysis.htm>);
- 3) осадки за период с 1979 г. и по настоящее время (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/globalprecip>),
- 4) архив NDP048, содержащий ряды многолетних наблюдений на 225 метеорологических станциях бывшего СССР (<http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/ndp048>) и др.
- В ходе проведения численных экспериментов с современными глобальными климатическими моделями генерируется большой объем данных (вплоть до 1 Гб при расчете на 1 месяц), что требует специальных усилий по их визуализации, обработке и анализу.

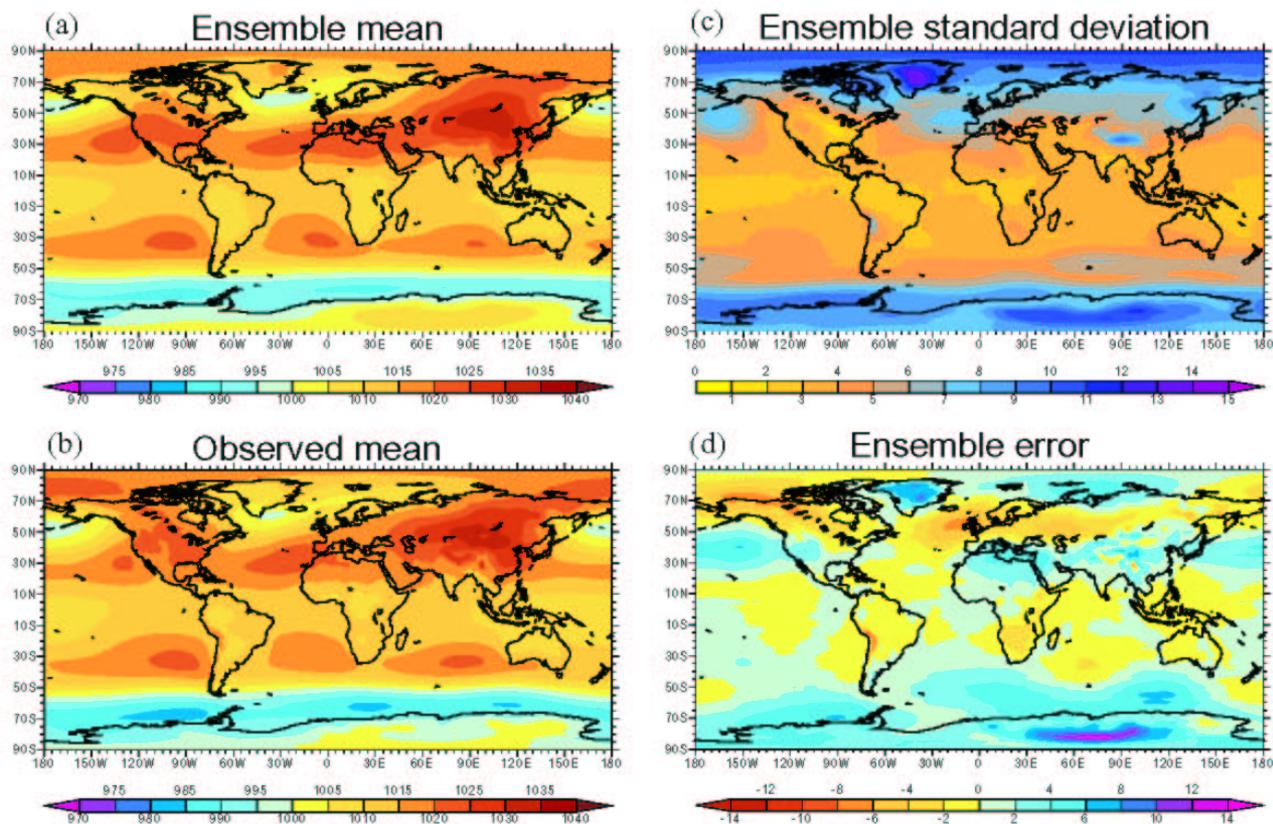
# Задачи моделирования климата

- Требуется воспроизвести как климатологию (сезонные и месячные средние), так и статистики изменчивости: внутрисезонной (муссонный цикл, характеристики шторм-треков и т.п.) и климатической (доминирующие моды межгодовой изменчивости такие как явление Эль-Ниньо или Арктическое колебание).
- Центральной проблемой современной теории климата является проблема предсказания его изменений, вызванных антропогенной деятельностью.
- К числу основных задач моделирования регионального климата следует отнести воспроизведение с высокой степенью детализации его характеристик, исследование особенностей гидрологического цикла, оценка возможности экстремальных явлений, исследование последствий региональных климатических изменений для окружающей среды и социально-экономических отношений.
- АМІР стал признанным стандартным тестом исследования возможностей атмосферных моделей общей циркуляции атмосферы воспроизводить наблюдаемый климат, инструментом выявления систематических ошибок и средством их совершенствования на основе взаимосвязанных процедур диагноза модельных результатов и численного экспериментирования

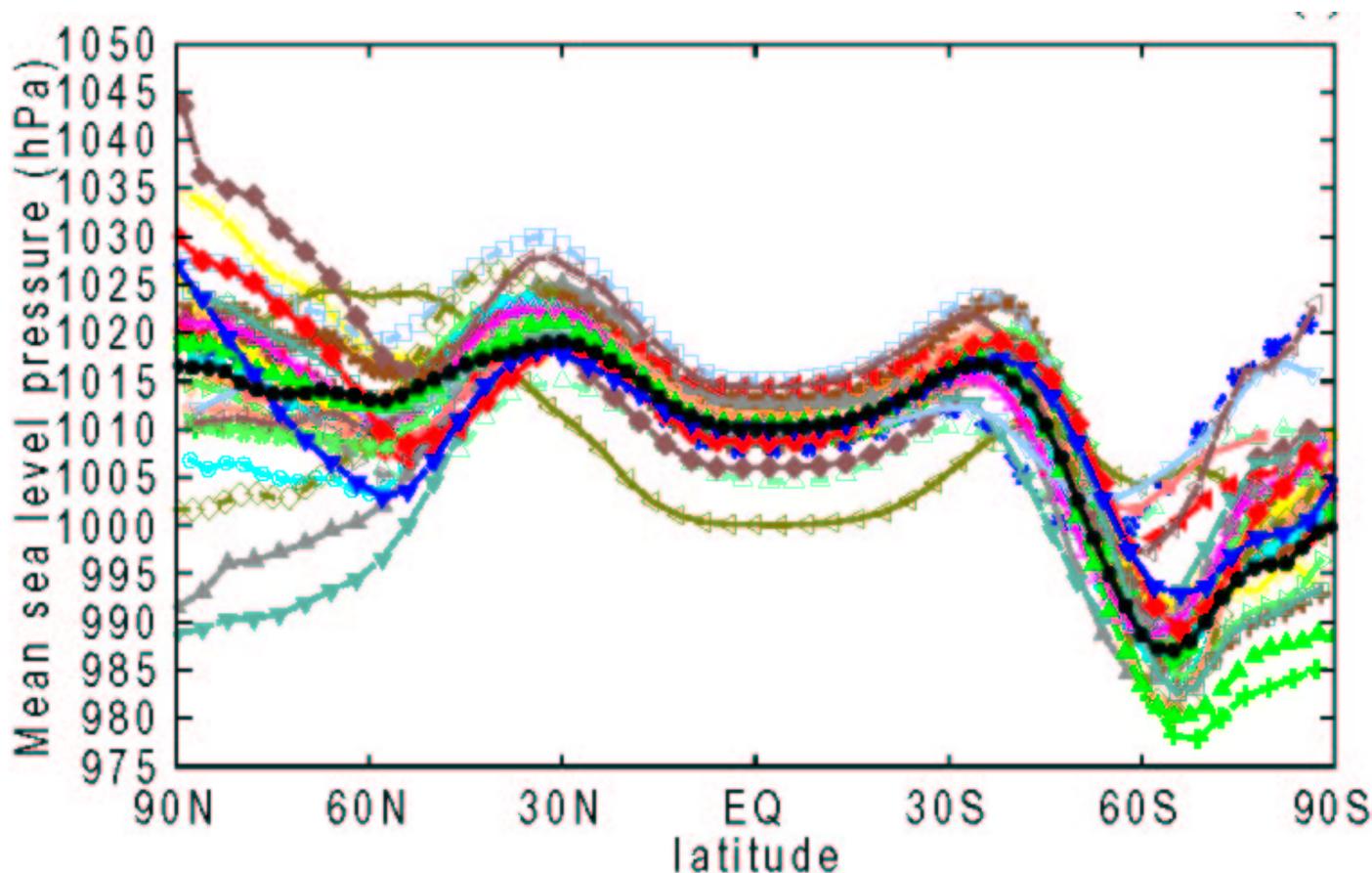
# Результаты проекта АМІР-І

- Модели общей циркуляции атмосферы были проинтегрированы на 10 лет с заданными наблюдаемыми за 1979-1988 г.г. распределениями температуры поверхности океана и морского льда.
- Стандарт генерируемых моделями данных включал ежемесячно осредненные глобальные распределения (см. <http://www-pcmdi.llnl.gov/amip/OUTPUT/amip1so.htm>) атмосферных параметров.
- Установлено, что крупномасштабные сезонные распределения давления, температуры и циркуляции достаточно хорошо согласуются с имеющимися на настоящее время данными наблюдений.
- Крупномасштабная структура осадков и потока тепла на поверхности океана также соответствует оценкам, получаемым на основе данных наблюдений, но имеются большие отличия в низких широтах между результатами различных моделей.
- Недостаточно хорошо воспроизводится суммарная облачность, особенно, в южном полушарии.
- Воспроизведение моделями сезонного цикла (амплитуды и фазы первой годовой гармоника давления на уровне моря) почти во всех регионах оказалось близким к тому, что имеет место в реальной атмосфере.
- Межгодовая изменчивость давления на уровне моря в тропической части Тихого океана (за исключением занижения амплитуды основных явлений Эль-Ниньо) соответствует ее наблюдаемым распределениям.
- В средних широтах расхождения с данными наблюдений оказываются более существенными.

Географическое распределение среднезимнего давления на уровне моря (гПа) за 1979-1988 г.г.: а) среднее по ансамблю моделей, б) данные реанализа ЕЦСПП, с) среднеквадратичное отклонение по ансамблю моделей, d) абсолютная ошибка (Gates et al., 1998).



Зонально осредненное давление на уровне моря для зимнего сезона, рассчитанное по результатам различных моделей, участвовавших в АМIP-I, в сравнении с наблюдаемым (жирная линия) распределением (реанализ ЕЦСПП – Gibson et al., 1977). Зеленоватато-коричневая кривая с символами соответствует данным модели ИВМ РАН.



# Диаграмма Тейлора

Пусть климатическая характеристика, воспроизводимая моделью, описывается некоторой функцией  $P$ , а наблюдаемое (реперное) распределение – функцией  $P_r$ . Оценка осредненного пространственно-временного расстояния между  $P$  и  $P_r$  может быть выражена в виде среднеквадратичных статистик  $E^2 = \sum [P - P_r]^2$

где суммирование ведется по  $N = ST$  - полному числу пространственных узлов  $S$  и временных интервалов  $T$  с использованием весовых множителей в случае неравномерных выборок.

Величина  $E$  представляет собой полную среднеквадратичную разность между модельным результатом и реперными данными. Из этой величины можно выделить две составляющие, одна из которых связана с ошибками в пространственно-временных средних, а другая - с различиями в пространственно-временной структуре.

Пусть  $P = \bar{P} + P'$ ,  $P_r = \bar{P}_r + P'_r$ , где чертой сверху обозначены средние, а штрихом – отклонения от них. Тогда ошибка в средних может быть вычислена как  $\bar{E} = \bar{P} - \bar{P}_r$ , а структурная ошибка как  $E'^2 = \sum [P' - P'_r]^2$ .

Полная среднеквадратичная ошибка есть  $E^2 = \bar{E}^2 + E'^2$ .

Чтобы обеспечить сравнимость среднеквадратичных ошибок между различными моделями и/или процессами с различной естественной изменчивостью, вводится понятие приведенной среднеквадратичной ошибки  $E_n = E/V_r$ , где

$$V_r^2 = \sum [P'_r]^2$$

представляет собой дисперсию реперного поля. Соответственно можно ввести понятия приведенных ошибок в средних  $\bar{E}_n$  и структурных ошибок  $E'_n$ .

Полезным критерием качества моделей является коэффициент пространственно-временной корреляции  $R$  между рассчитанными и реперными данными, определенный следующим образом:

$$R = \sum P'P'_r / VV_r,$$

где  $V$  - пространственно-временное среднеквадратичное отклонение модельного поля  $P$ . Можно показать (Taylor, 2001), что

$$E'^2 = V^2 + V_r^2 - 2VV_rR.$$

Геометрическую трактовка: в треугольнике со сторонами  $V$  и  $V_r$ , образующими угол  $\alpha = \arccos(R)$ , величина  $E'$  представляет собой длину противоположной углу ? стороны. Аналогичная формула имеет место для приведенной структурной ошибки:

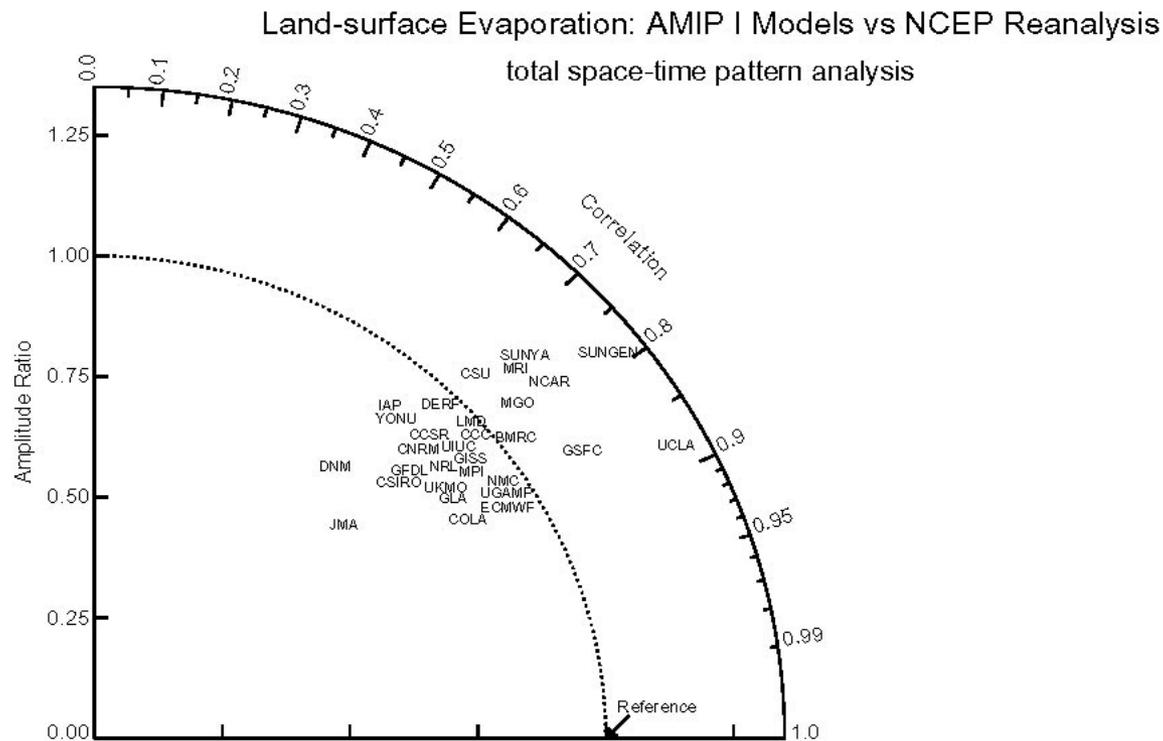
$$E_n'^2 = 1 + (V/V_r)^2 - 2(V/V_r)R.$$

Диаграмма Тейлора строится в полярных координатах, позволяющих разложить приведенную структурную ошибку  $E_n'$  на амплитудную и фазовую ошибки.

Та часть  $E_n'$ , что связана с амплитудной ошибкой, выражается величиной  $(V - V_r)/V_r$ , представляющей собой радиальное смещение от четверти окружности единичного радиуса.

Часть  $E_n'$ , обусловленная фазовой ошибкой, характеризуется азимутальным смещением от реперной точки, нормированным на косинус пространственно-временной корреляции  $R$ .

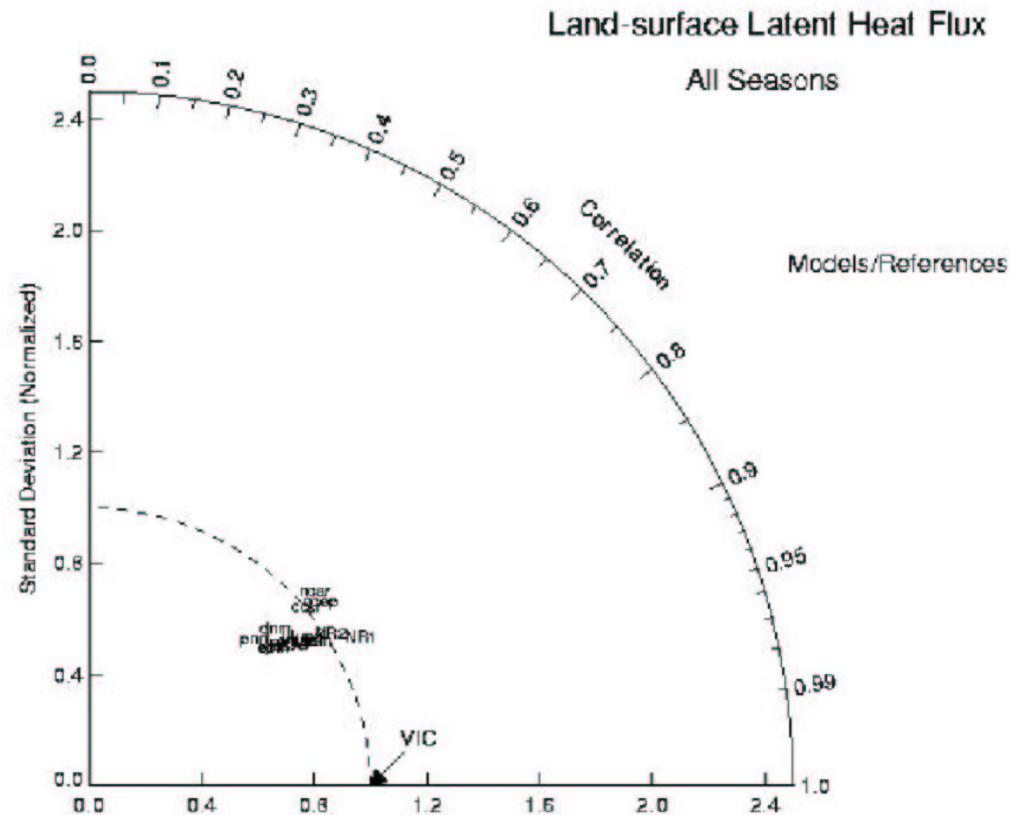
Диаграмма Тейлора структуры модельных полей изменчивости (1979-1988 г.г.) monthly averaged evaporation over land surface from the results of AMIP-I in comparison with reanalysis (“Reference”) NCEP (Phillips et al., 2000).



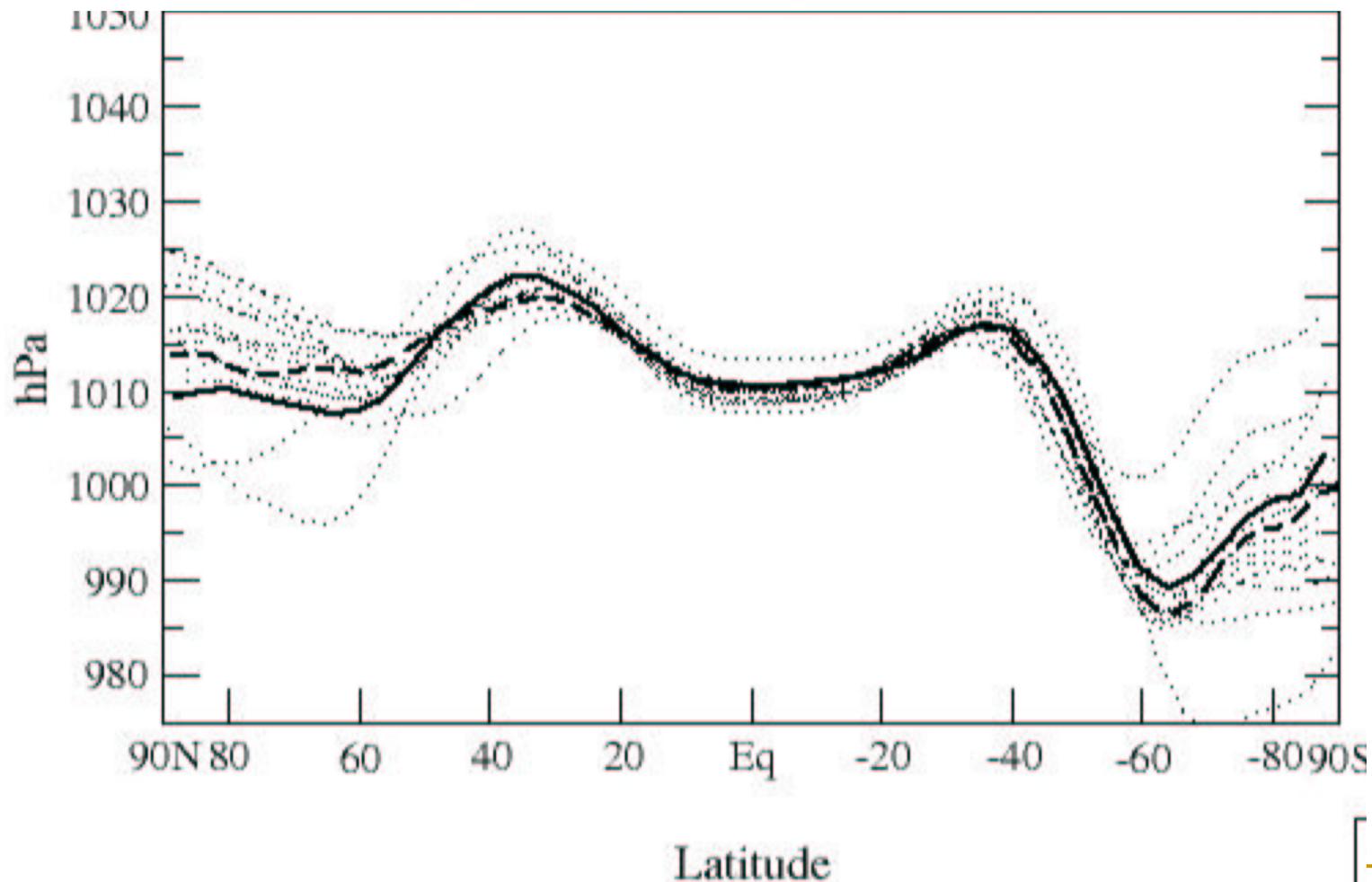
# Результаты АМІР-II

- Предварительные результаты АМІР-I обсуждались на международной научной конференции по АМІР (Gates, 1995), где был сделан вывод о необходимости продолжения проекта в виде следующей его фазы АМІР-II.
- В ходе выполнения этого проекта интегрирование моделей проводилось на 17 лет с заданными наблюдаемыми в течение 1979-1995 г.г. распределениями температуры поверхности океана и границ морского льда.
- По сравнению с АМІР-I, модели были существенно модифицированы, в частности, в представлении процессов взаимодействия атмосферы и суши.
- Особое внимание было уделено использованию Интернета (<http://www-pcmdi.llnl.gov/amip>) как для координации деятельности по проекту, так и для распространения его результатов.
- В результате выполнения программы АМІР были выявлены многие ключевые механизмы, ответственные за формирование климата.
- Эту программу можно рассматривать как программу исследования чувствительности "идеальной" модели атмосферы по отношению к степени детализации описания различных физических процессов.

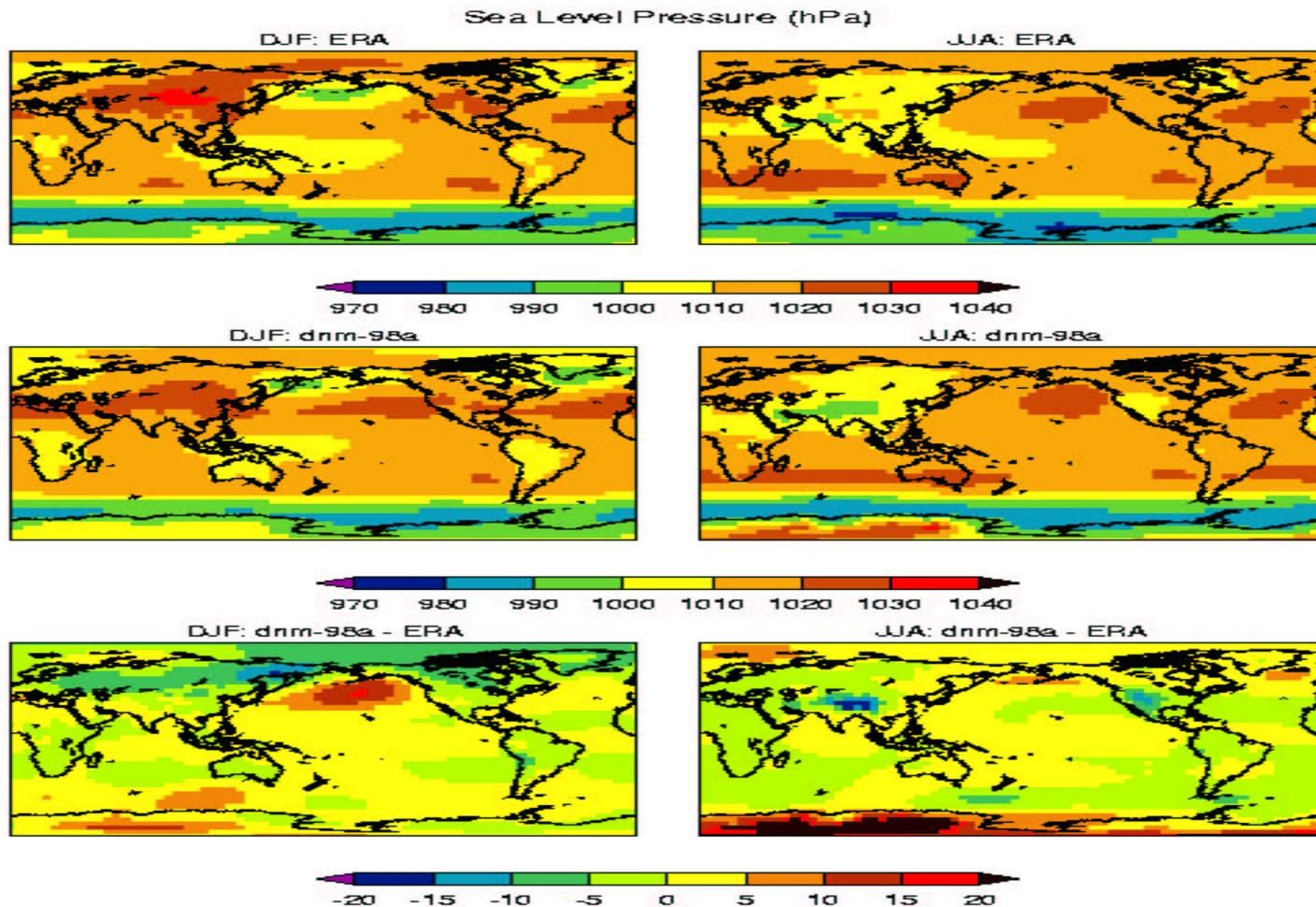
Диаграмма Тейлора для изменчивости потока скрытого тепла на поверхности суши по данным эксперимента AMIP-II (Irannejad et al., 2002).



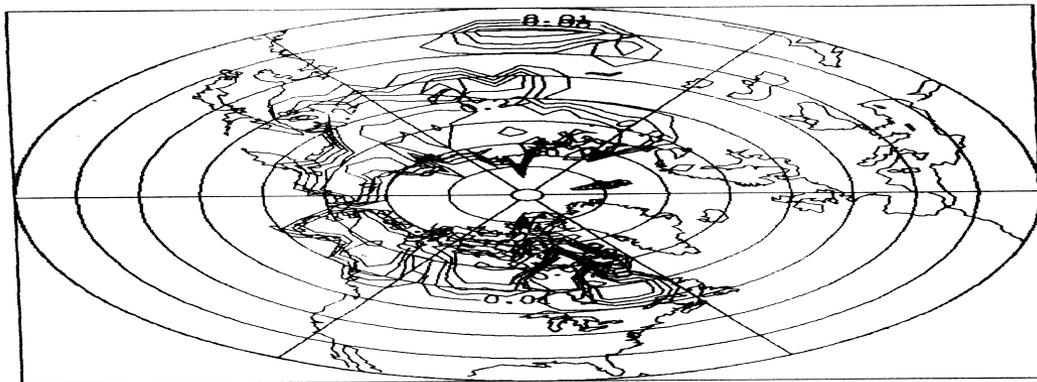
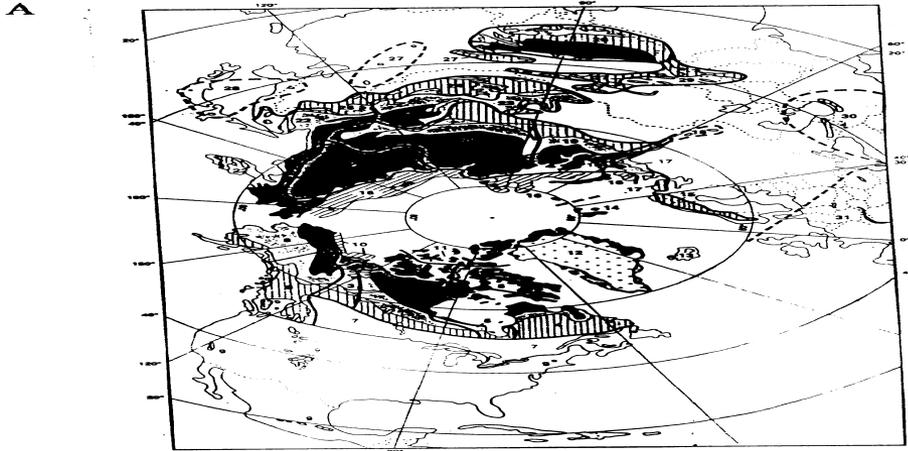
Зонально-средненное давление для зимнего сезона, рассчитанное по результатам эксперимента АМІР-II (данные ИВМ РАН - сплошная линия, данные наблюдений - прерывистая линия).



Географические распределения давления на уровне моря для зимнего сезона (левая колонка) и летнего сезона (правая колонка). Верхняя часть рисунка – данные реанализа ЕЦСПП ERA, средняя часть – расчеты с моделью ИВМ, нижняя часть – систематические ошибки.



а) Наблюдаемое распределение вечной мерзлоты. Вертикальная штриховка - отдельные островки мерзлоты, серый цвет - мерзлота с отдельными разрывами, черный цвет - непрерывная мерзлота. б) Распределение количества льда на глубине 2 м в сентябре по данным модели.



# Проект СМІР

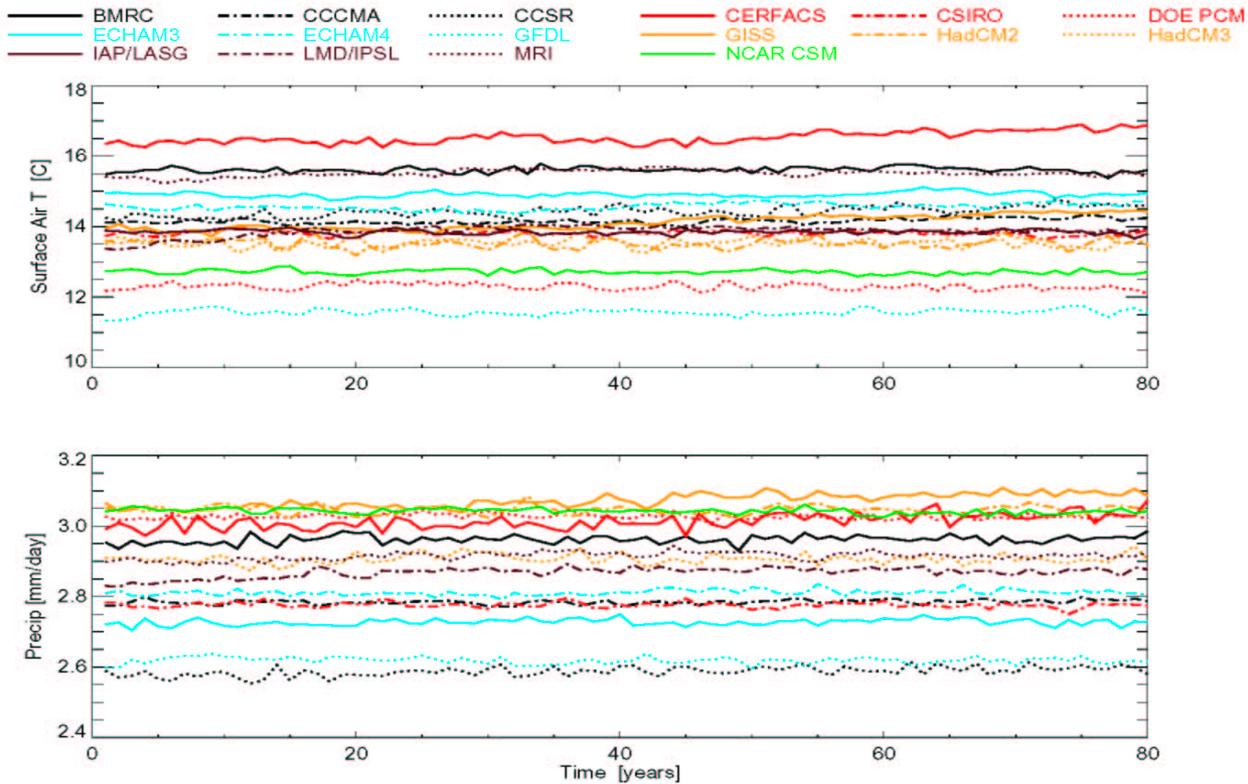
- проект сравнения совместных моделей СМІР (Coupled Model Intercomparison Project) – две фазы: СМІР1 и СМІР2.
- В ходе выполнения СМІР1 основное внимание было обращено на воспроизведение поверхностной температуры, поскольку в экспериментах АМІР температура поверхности океана считалась заданным внешним параметром. В СМІР2 дополнительно эксперименты с удвоением CO<sub>2</sub>.
- 80-летние численные эксперименты по воспроизведению современного климата, в том числе, с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана ИВМ РАН (Дианский и Володин, 2002, Дымников и др., 2003).
- Начальные условия для совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана: климатические распределения прогностических атмосферных и океанических переменных на 1-е января, рассчитанных в отдельных экспериментах с моделью атмосферы (Алексеев и др., 1998) при заданных в соответствии с наблюдаемыми в период с 1979 по 1996 год распределениях температуры поверхности океана и границ морских и континентальных льдов) и с моделью океана (Дианский и др., 2002) при заданном годовом цикле атмосферного воздействия (Kalnay et al., 1996).

# Результаты CMIP2 (Covey et al., 2003)

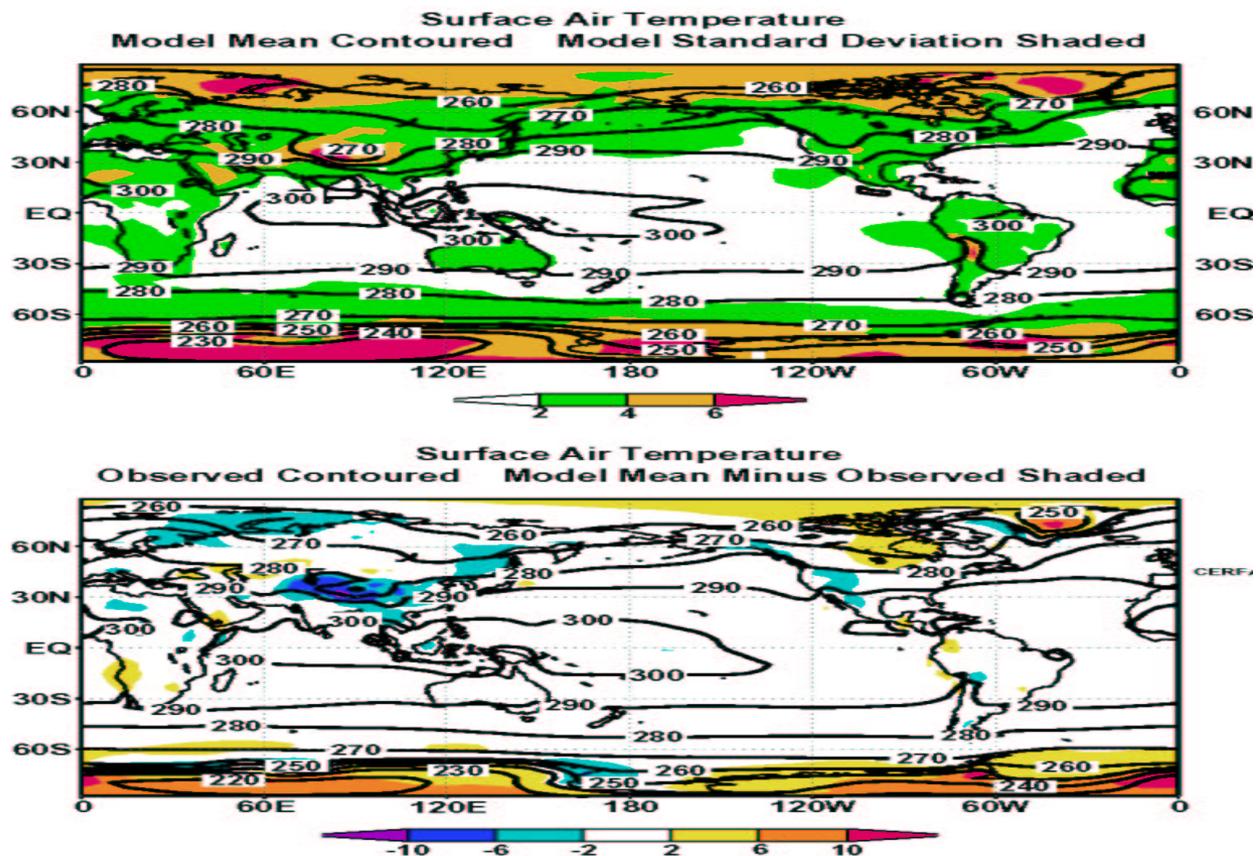
- Современные модели, не использующие процедуру коррекции потоков тепла на поверхности раздела «атмосфера-океан», способны успешно конкурировать с моделями, в которых такая процедура применяется.
- Около половины совместных моделей нового поколения (в том числе, модель ИВМ РАН) не используют процедуру коррекции потоков тепла.
- Совместные модели демонстрируют сравнительно небольшой разброс в климатических значениях глобально осредненной температуры: от 12°C до 16°C.
- Пространственные распределения климатических характеристик демонстрируют как области хорошего согласия с данными наблюдений, так и систематические ошибки.
- Глобальные статистики показывают, что различия между результатами внутри ансамбля моделей не на много больше различий между данными реанализов.
- Иными словами, качество воспроизведения современного климата современными совместными моделями находится в интервале неопределенности, который присущ современным базам.

# Глобально-осредненные среднегодовые температура поверхности (верх) и осадков (низ)

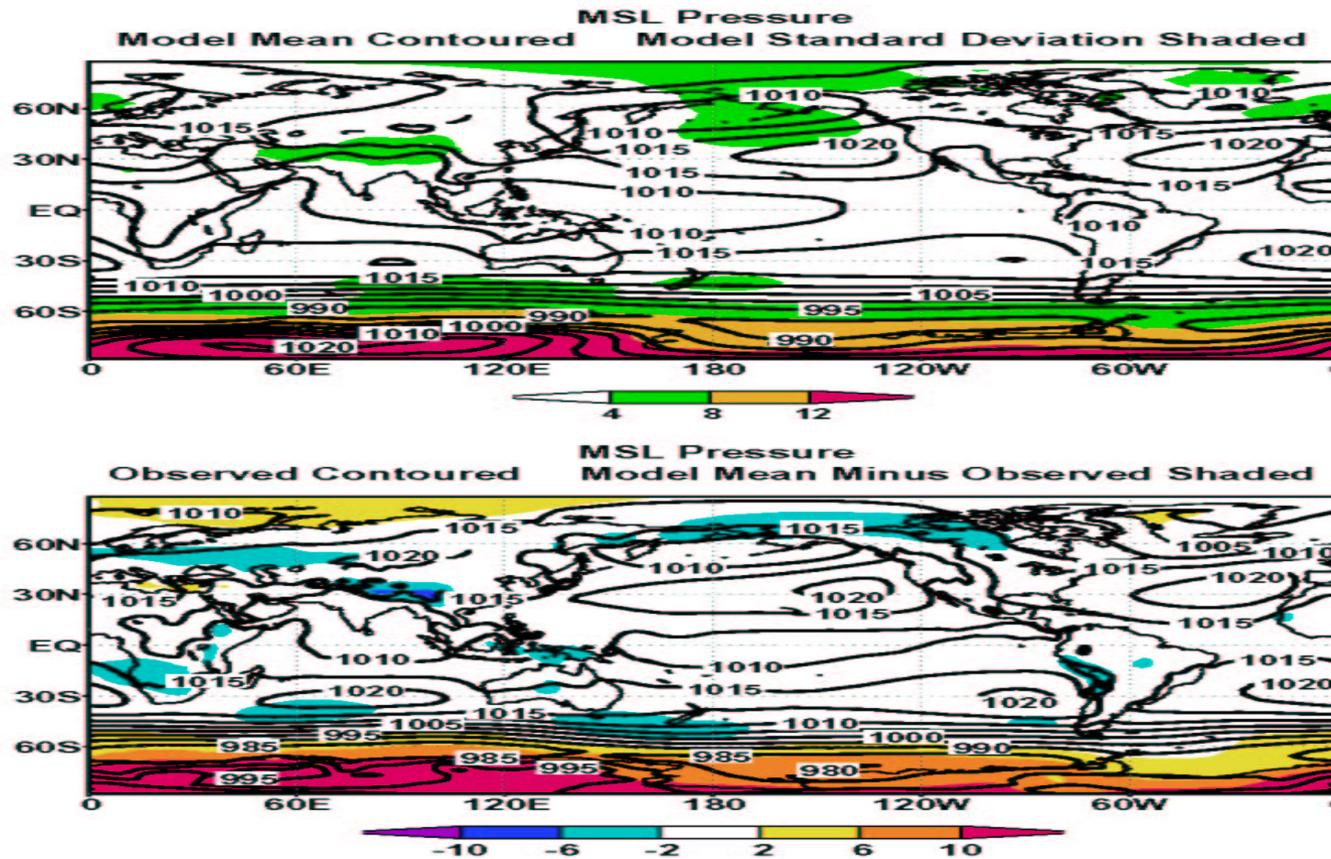
Global+Annual Means for Control Run



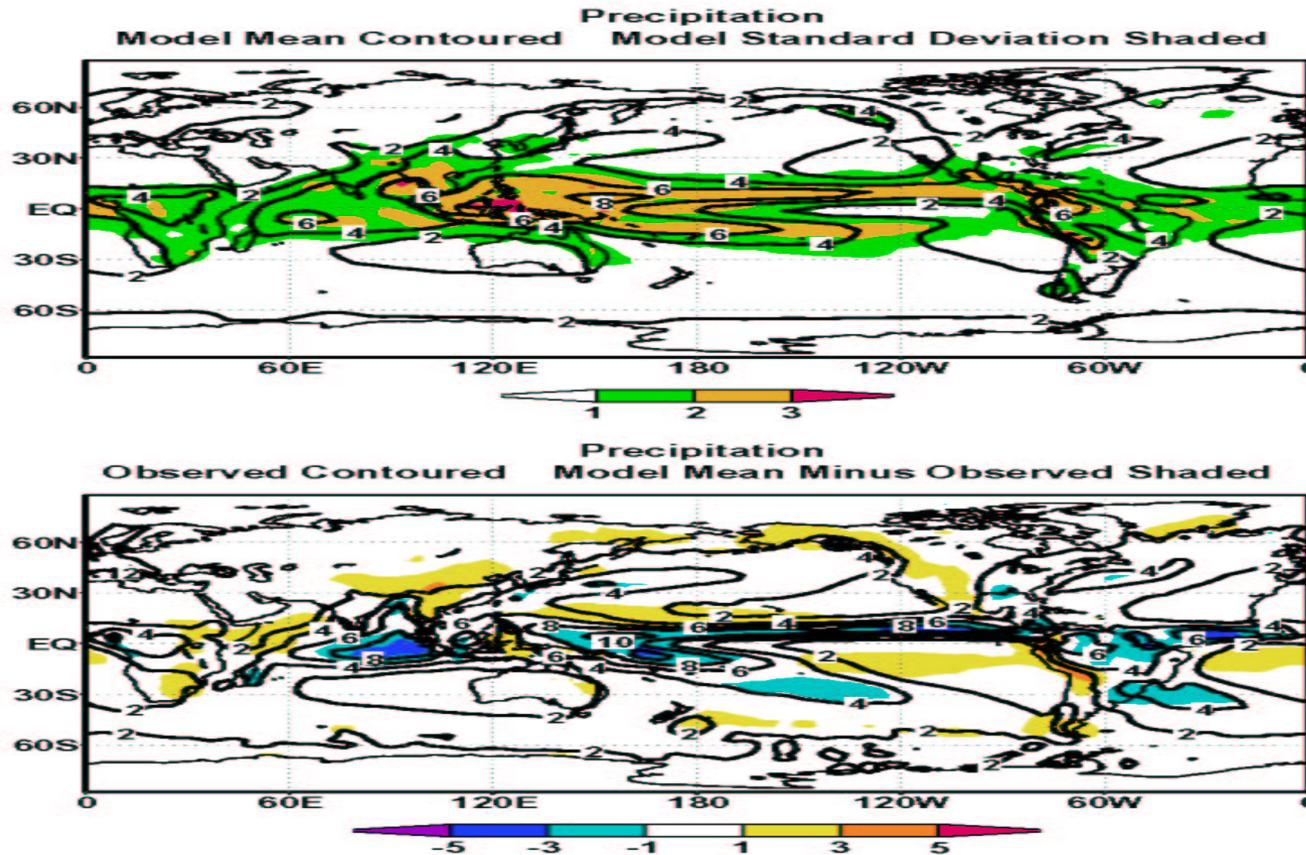
Верх: средняя по ансамблю моделей температура приземного воздуха (изолинии) и стандартное отклонение (цветное затенение). Низ: наблюдения (изолинии) и среднемоделльные ошибки (цветное затенение).



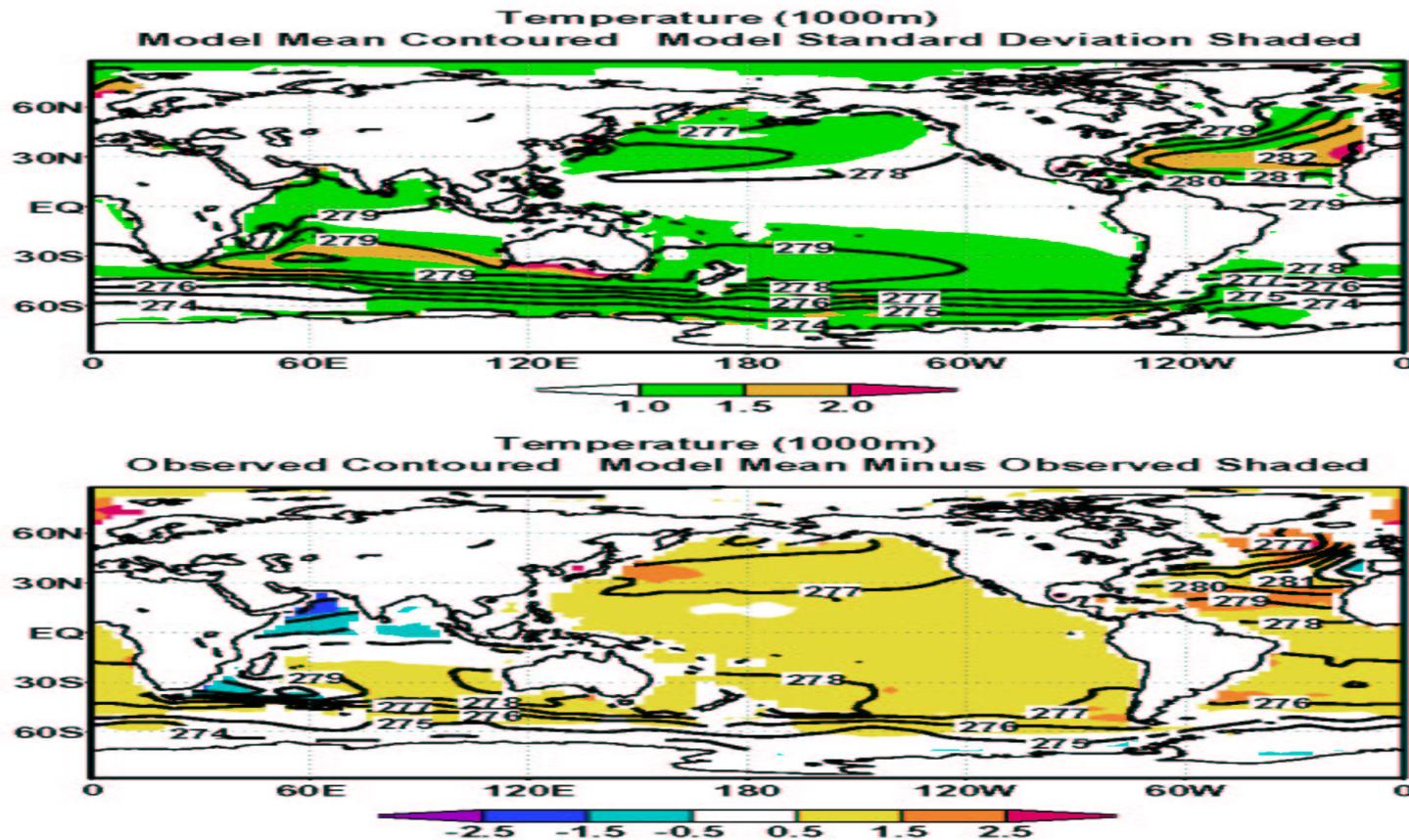
Верх: среднее по ансамблю моделей давление на уровне моря (изолинии) и стандартное отклонение (цветное затенение). Низ: наблюдения (изолинии) и среднемоделные ошибки (цветное затенение).



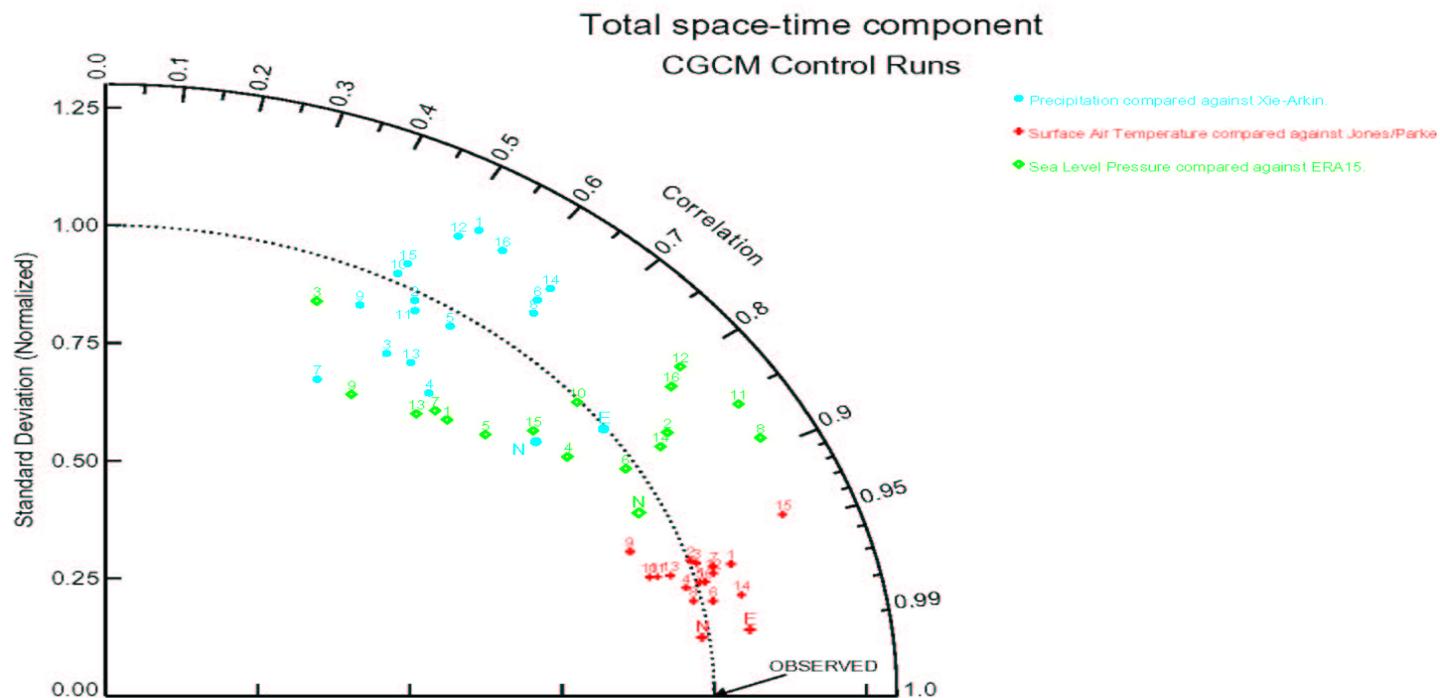
Верх: средние по ансамблю моделей осадки (изолинии) и стандартное отклонение (цветное затенение). Низ: наблюдения (изолинии) и среднемоделльные ошибки (цветное затенение).



Верх: средняя по ансамблю моделей температура океана на глубине 1000 м (изолинии) и стандартное отклонение (цветное затенение). Низ: наблюдения (изолинии) и среднемоделные ошибки (цветное затенение).



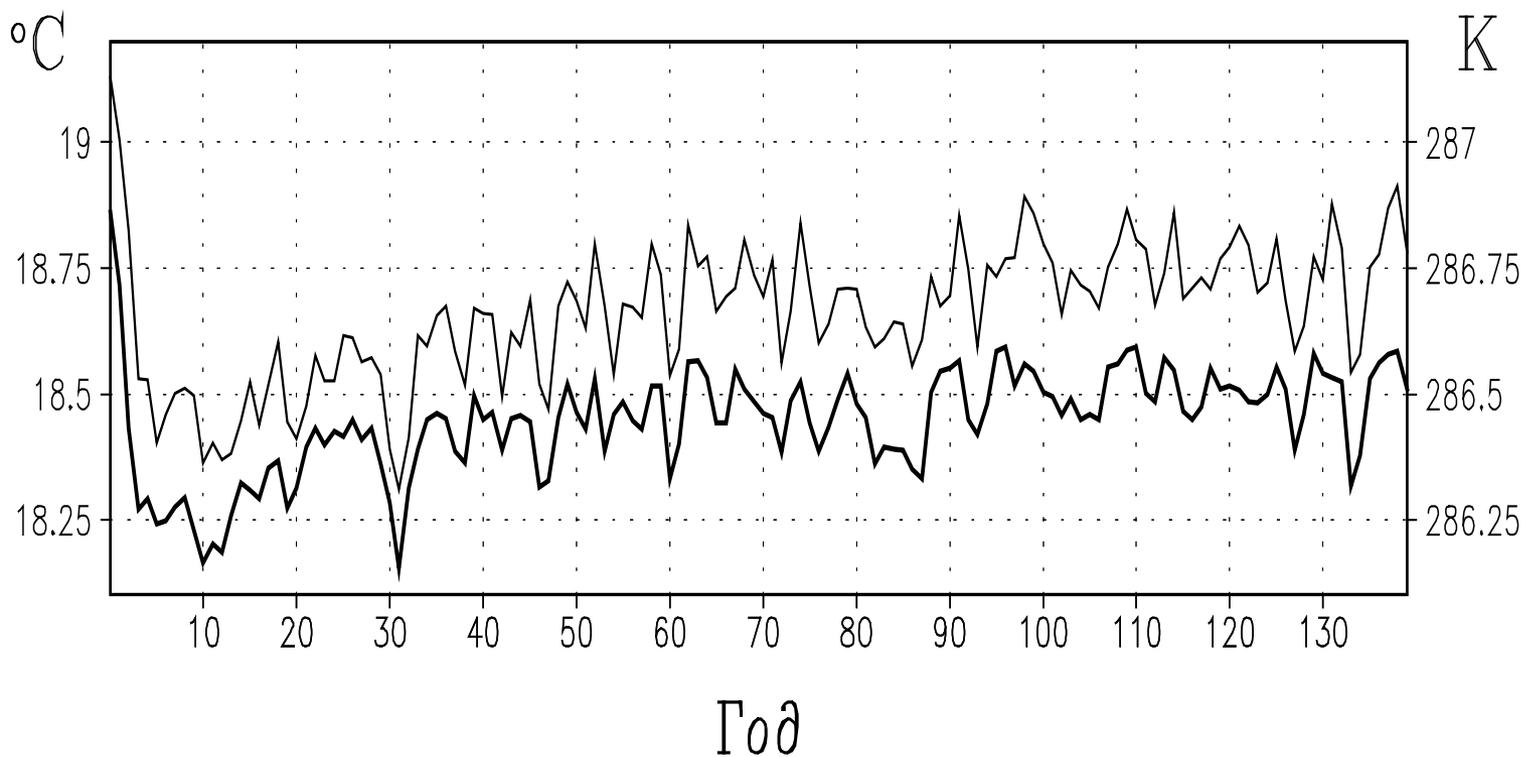
# Диаграмма Тейлора для приземной температуры, давления на уровне моря и осадков



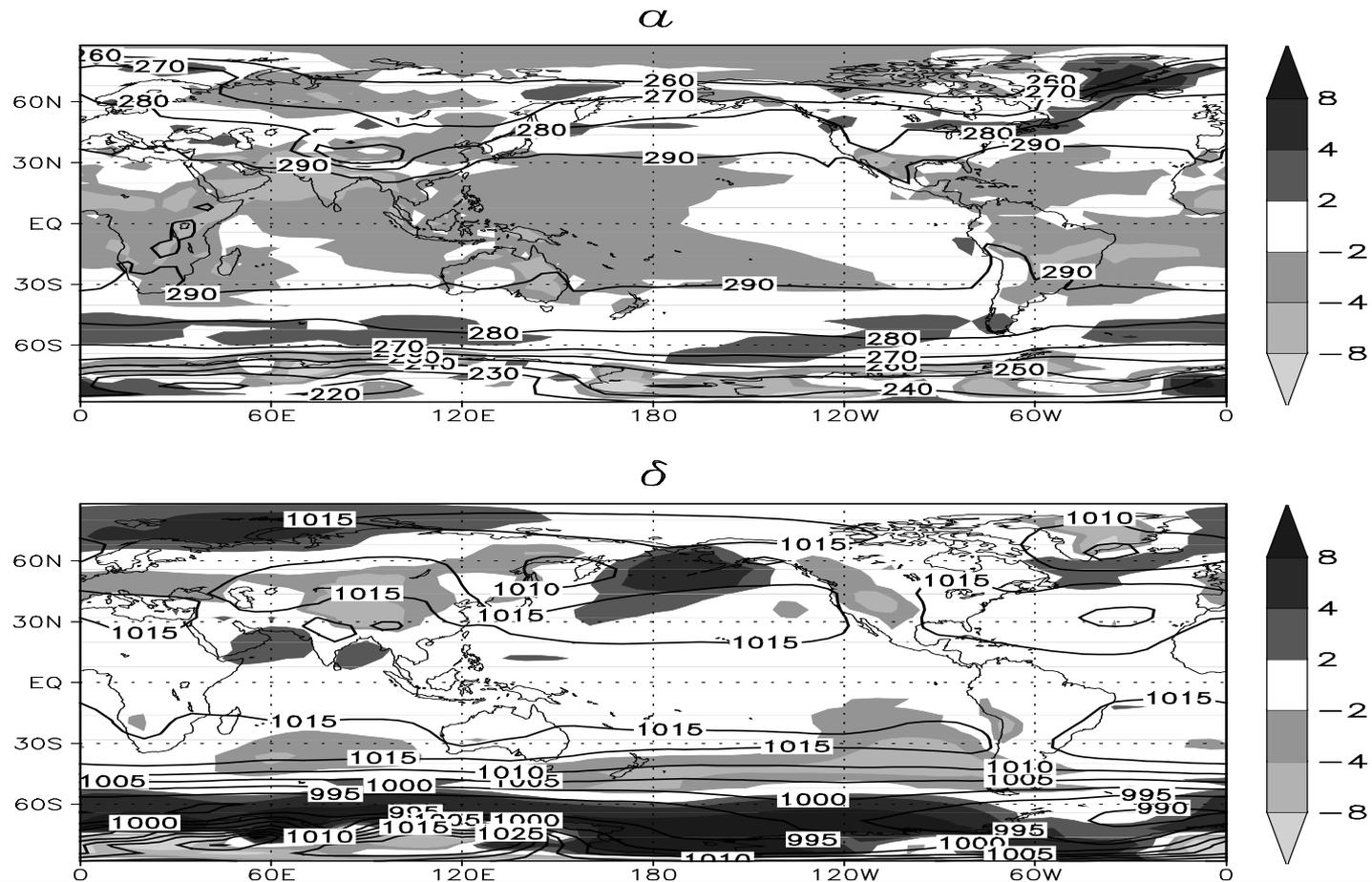
# Результаты совместной модели ИВМ

- Построена модель климатической системы без использования процедуры коррекции потоков на поверхности океана. Этого удалось достичь за счет того, что модели атмосферы и океана сами по себе достаточно хорошо воспроизводят климатические состояния атмосферы и океана.
- Анализ временного хода глобально осредненной ТПО показывает наличие двух характерных временных масштабов в совместной модели.
- Первый имеет величину около 5-ти лет и отвечает за относительно быстрое согласование характеристик атмосферной части и верхнего деятельного слоя океана.
- Второй – около 60-ти лет - определяется временем выхода совместной модели на квазиравновесный режим с учетом глубинных слоев океана.
- Совместная модель ИВМ неплохо воспроизводит пространственную структуру и величины изменчивости ТПО в тропиках Тихого океана.
- Однако, структура временной изменчивости модельных аномалий ТПО такова, что в модели процессы соответствующие ситуациям Ла-Нинья имеют большую амплитуду, чем процессы соответствующие ситуациям Эль-Ниньо.

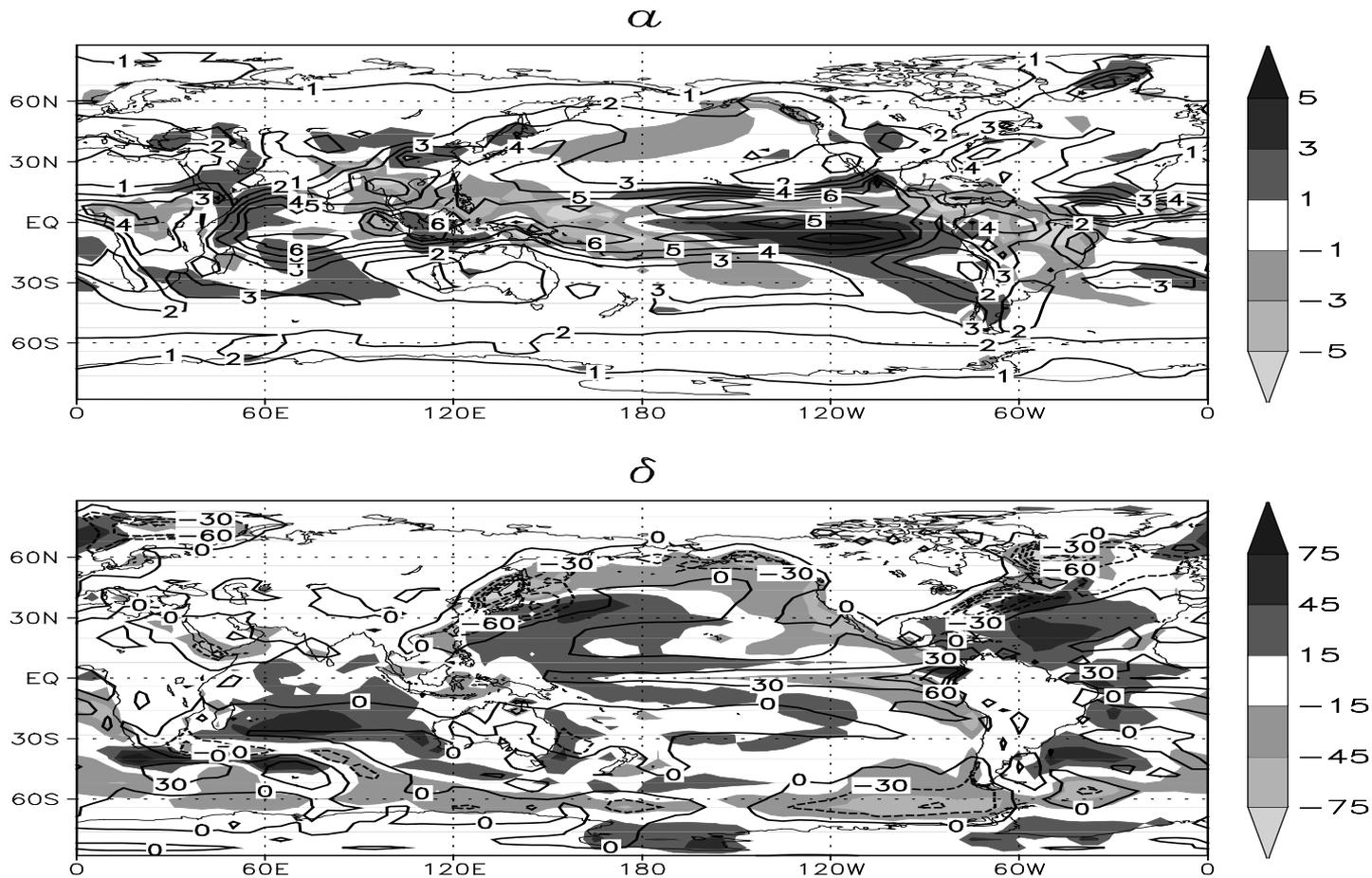
Временной ход среднегодовых глобально осредненных значений температуры поверхности океана (ТПО, жирная линия) и температуры поверхности с учетом суши (ТП, тонкая линия). Шкала ТПО показана слева в  $^{\circ}\text{C}$ , для ТП - справа в К.



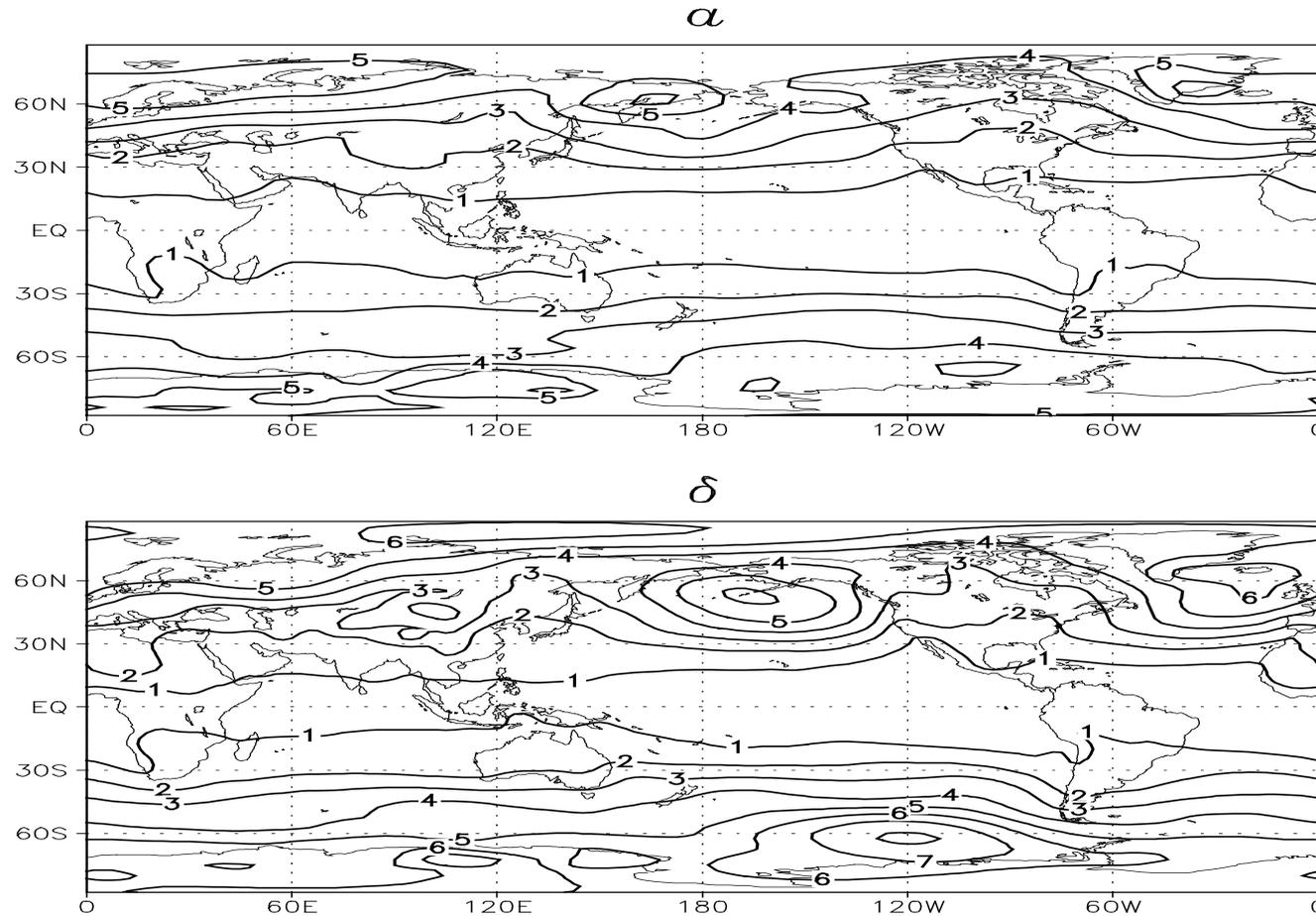
а) Средняя за 80 лет температура приповерхностного воздуха на высоте 2 м в совместной модели (изолинии с шагом 10 К) и ее отклонения от данных реанализа NCEP, осредненных за 1950-2000 г.г., показанные с помощью затемнения разной интенсивности со шкалой градаций в К, расположенной справа от рисунка. б) То же самое для давления (в гПа) на уровне моря.



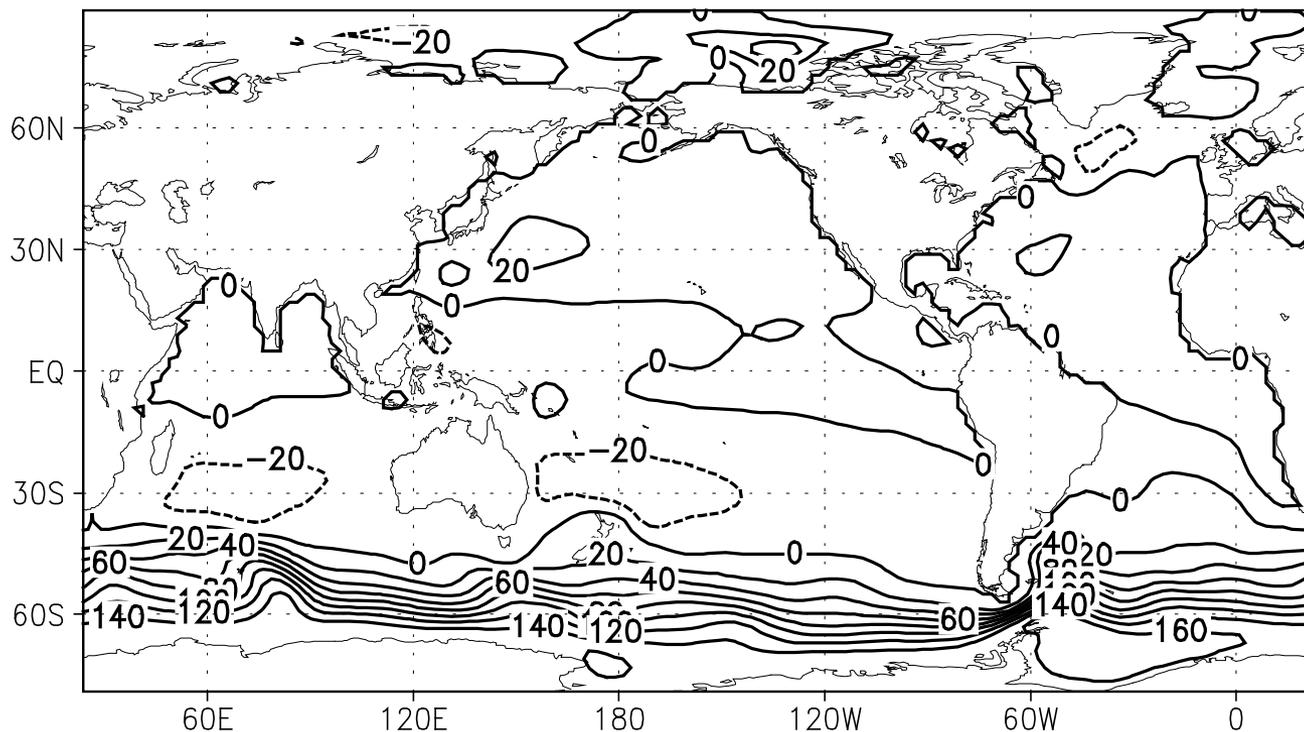
То же, что и на предыдущем рисунке, но а) для осадков (в мм/сут) и б) баланса тепла на поверхности (в Вт/м\*\*2).



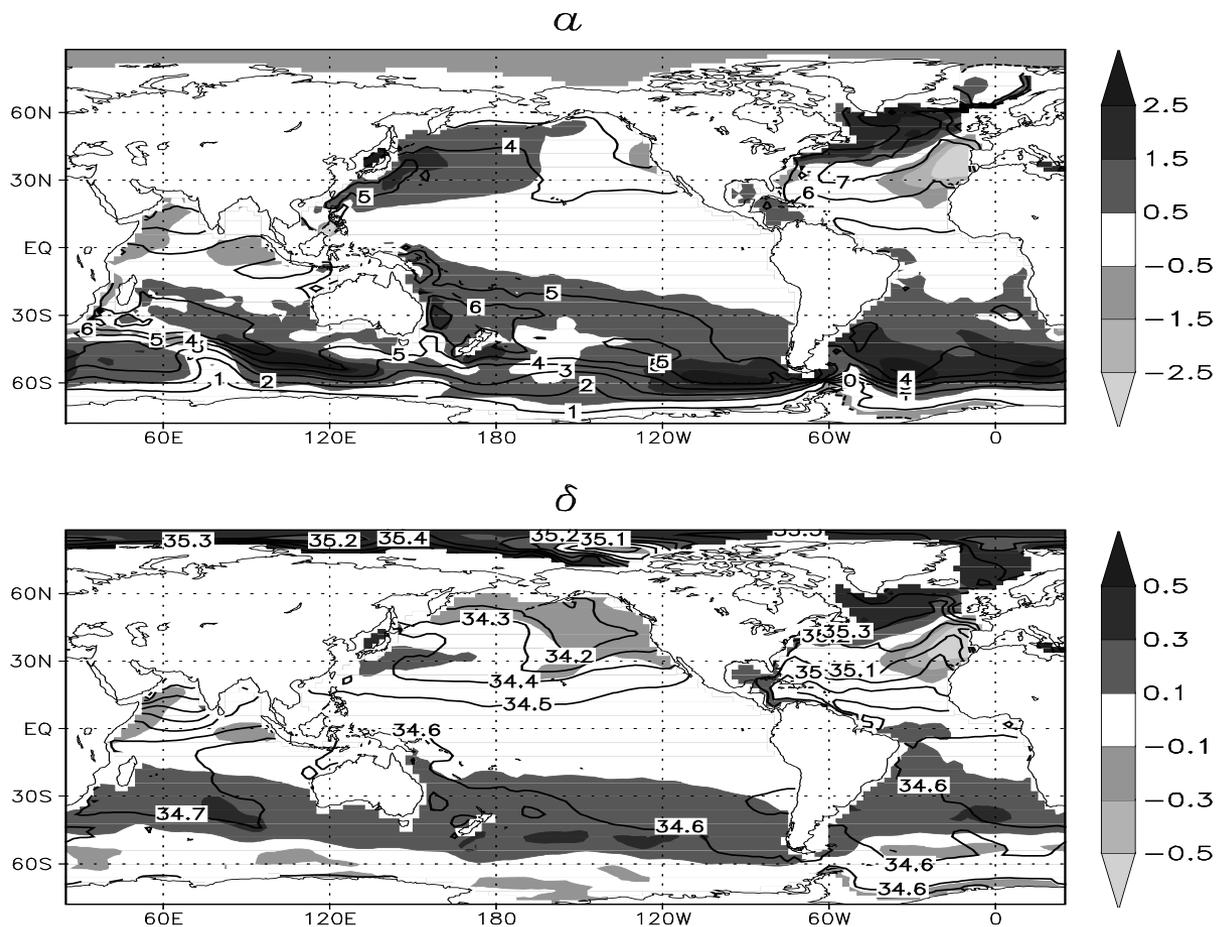
а) Среднеквадратичное отклонение за 80 лет среднемесячных аномалий давления на уровне моря в совместной модели (изолинии с шагом 1 гПа). б) - То же самое для данных реанализа NCEP за 1950-2000 г.г.



Средняя за 80 лет функция тока вертикально-осредненной циркуляции глобального океана в совместной модели (изолинии с шагом 20 Св). Сплошными изолиниями показаны положительные значения, соответствующие движению по часовой стрелке, а пунктирными - отрицательные величины, соответствующие движению против часовой стрелки.



а) Средняя за 80 лет потенциальная температура океана на глубине 1000 м в совместной модели (изолинии с шагом 10 0C) и ее отклонения от данных Левитуса, показанные с помощью затемнения разной интенсивности со шкалой градаций в 0C, расположенной справа от рисунка. б) То же самое для солености (‰).



а) СКО среднемесячных аномалий температуры поверхности (ТП) по данным реанализа NCEP за 1950-2000 г.г., показанные с помощью затемнения разной интенсивности и СКО за 80 лет среднемесячных модельных аномалий ТП, показанные с помощью изолиний с шагом 0.25 С.  
б) Временные зависимости среднемесячных аномалий ТПО, осредненных в районе Ниньо-3 по данным реанализа NCEP за 1950-2000 г.г. и в) результатов моделирования за 80 лет.

