

# *ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОФИЗИКИ В КОНТЕКСТЕ НАБЛЮДЕНИЙ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА*

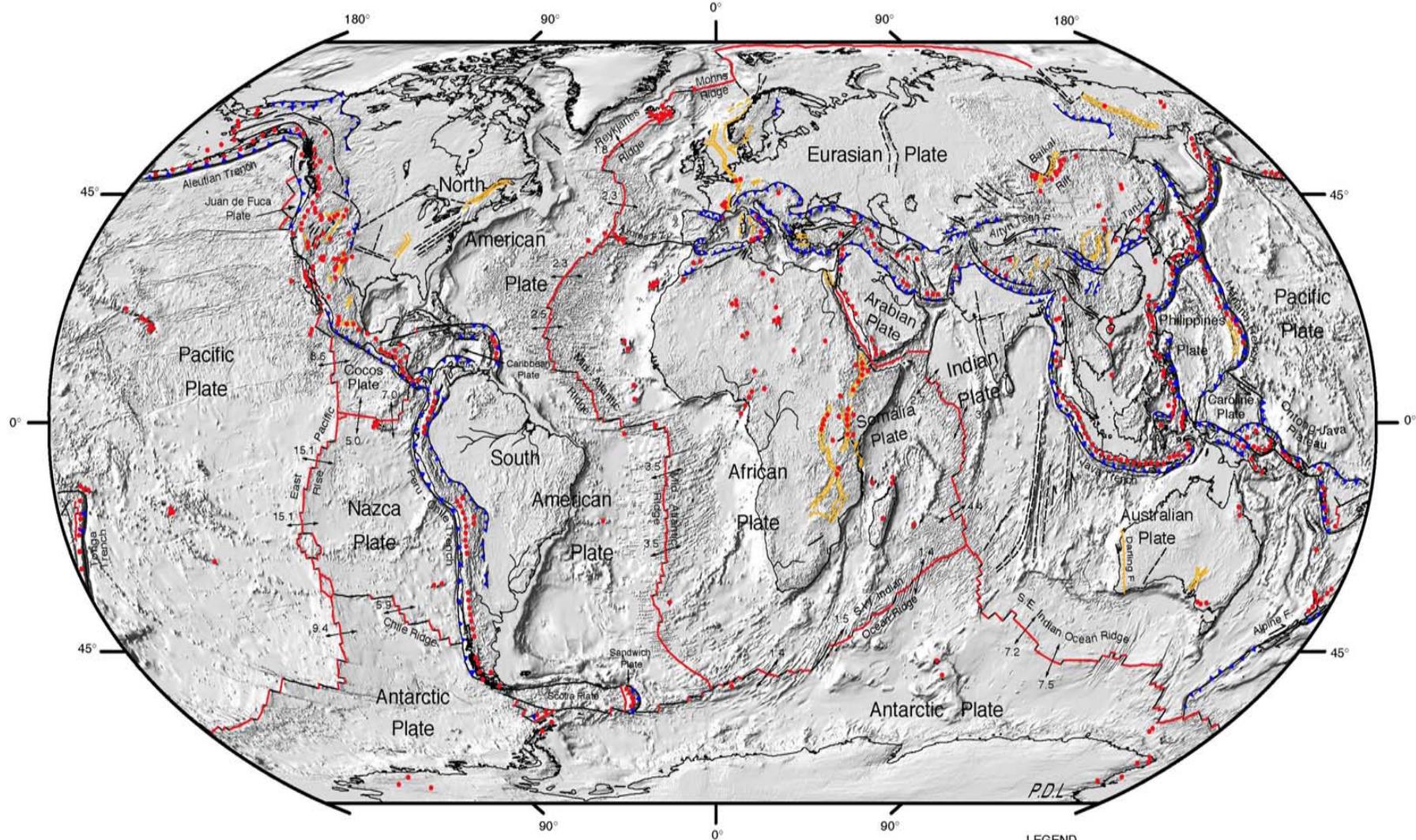
*В.В.Козодеров, Р.Н. Кузьмин  
МГУ им. М.В. Ломоносова*

## План доклада

1. *Погодно-климатические аномалии в тропических широтах Тихого океана и их глобальные проявления.*
2. *Объединение атмосферно-океанических процессов в тропических широтах Тихого океана с процессами в твердой оболочке Земли.*
3. *Модели колебаний океанической литосферной плиты Наска (0 - 40<sup>0</sup> ю.ш.; 75<sup>0</sup> – 110<sup>0</sup> в.д.) и их связи с аномалиями процессов в тропических широтах Тихого океана и глобальной атмосфере.*

# Исходные данные исследований

- Спутниковые системы за более, чем 30-летие инструментальных наблюдений температуры поверхности океана (ТПО), облачности и радиационного баланса Земли, позволили установить существование дипольного механизма конвективной активности в тропических широтах Тихого океана и отклик глобальной системы на аномалии ТПО в виде характерных конфигураций волн атмосферного давления; соответствующие исследования межгодовой изменчивости наблюдаемых величин заложили основы теории предсказуемости глобальных/региональных изменений природной среды.
- Спутниковые системы наблюдений дают возможность наблюдения условий возникновения и развития атмосферно-океанического явления «Эль-Ниньо/Южное Колебание/ЭНЮК» (El-Nino/Southern Oscillation - ENSO), которое проявляется в виде нагона теплых вод на побережье Перу и Эквадора (южное полушарие) каждые 3-7 лет и последующем выносе линзы холодных вод на данной акватории (явление Ла-Нина); при этом Южное Колебание – это общее название известного еще в доспутниковую эру различия атмосферного давления на о. Пасхи и п. Дарвин (северная часть Австралии), возникающие аномалии ТПО за счет ЭНЮК имеют глобальный отклик (в виде наводнений в одних частях земного шара и засух в других его частях).
- Данные ре-анализа (совместного использования спутниковых данных и данных наземных, корабельных и других измерений) способствуют построению цифровых карт глобальных геологических структур, литосферных плит, трещин, разломов и других особенностей строения земной коры.



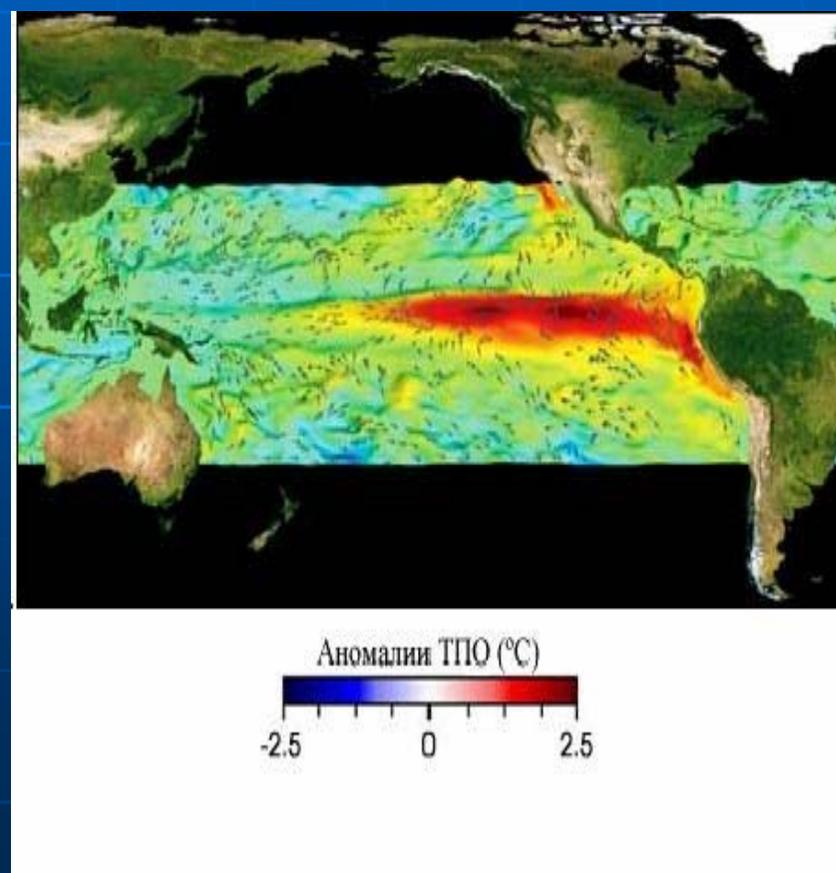
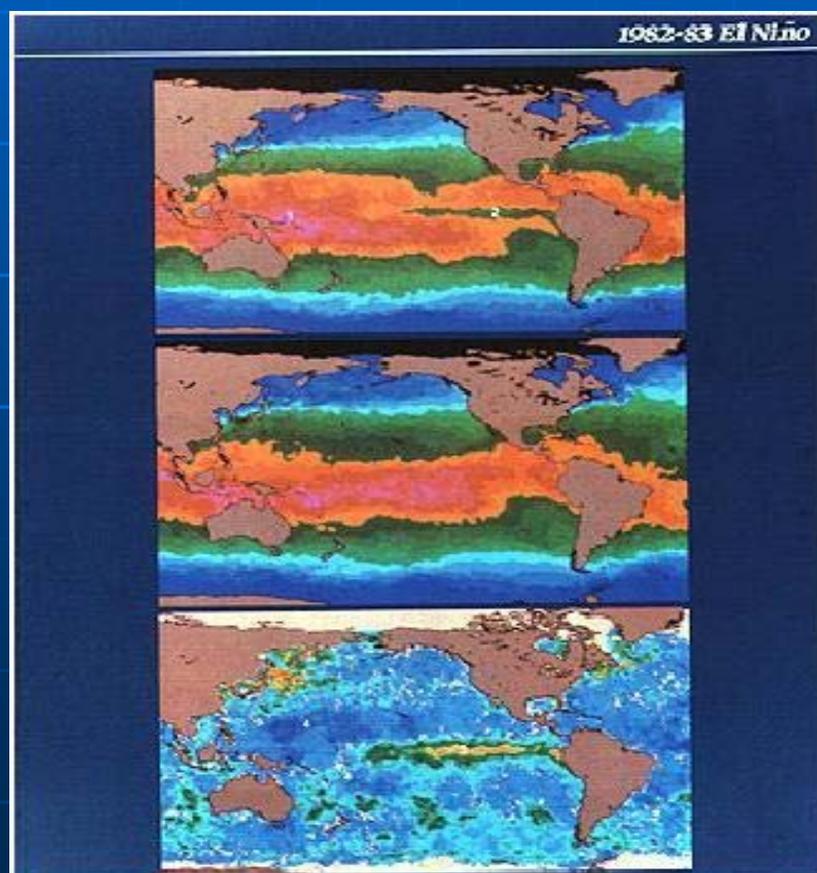
**DIGITAL TECTONIC ACTIVITY MAP OF THE EARTH**  
Tectonism and Volcanism of the Last One Million Years

**DTAM - 1**

Robinson Projection  
October 2002

- LEGEND**
- Actively-spreading ridges and transform faults
  - Total spreading rate, cm/year
  - Major active fault or fault zone; dashed where nature, location, or activity uncertain
  - Normal fault or rift; hachures on downthrown side
  - Reverse fault (overthrust, subduction zones); generalized; barbs on upthrown side
  - Volcanic centers active within the last one million years; generalized. Minor basaltic centers and seamounts omitted.

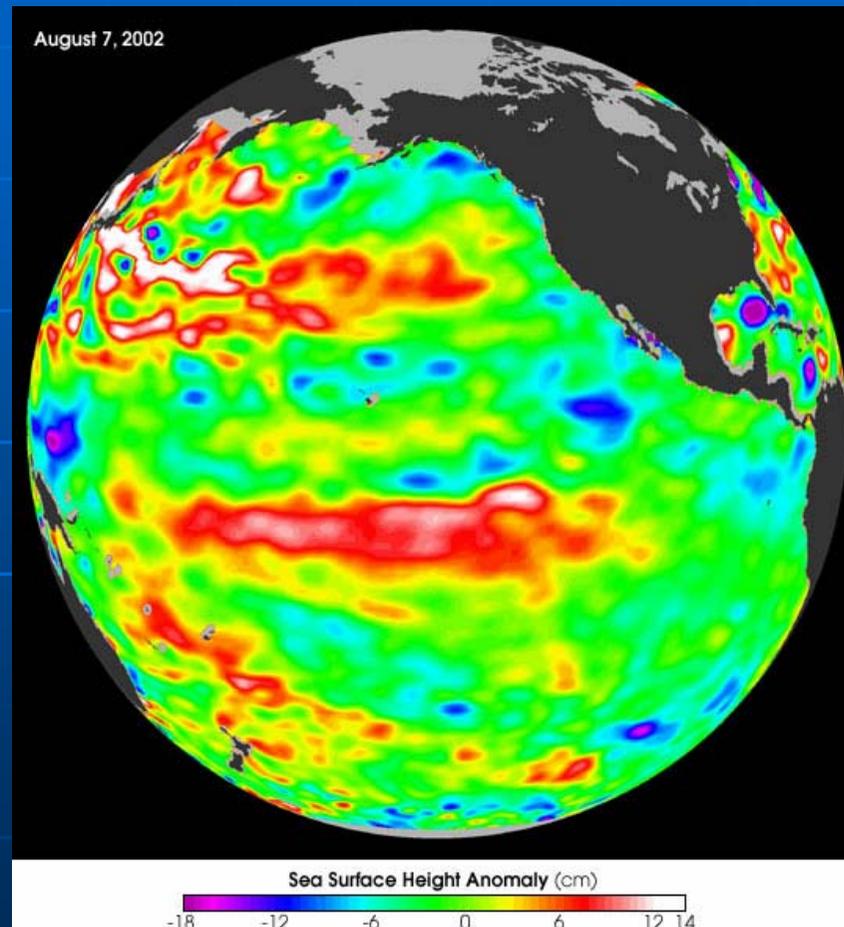
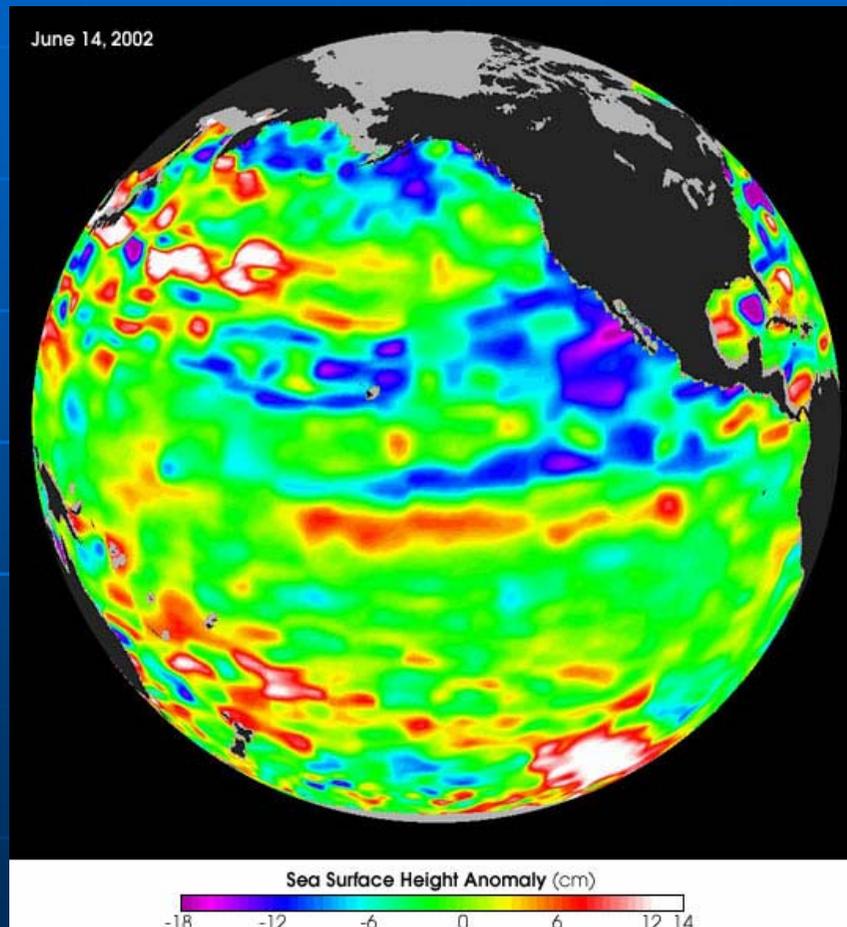
Три фазы Эль-Ниньо 1982-83 гг. (слева: лето, зима, весна) и состояние исследуемого бассейна на период середины июня 2004 г. (справа) по данным спутниковых наблюдений



# Основные положения формирования энергетики океана и атмосферы

- Энергия солнечного излучения поглощается большей частью в тропических широтах океанов, а уходит в космос преимущественно в средних и высоких широтах обоих полушарий, определяя баланс энергии глобальной системы.
- В тропических широтах Тихого океана в планетарном пограничном слое атмосферы преобладают восточные пассатные ветры, которые переносят к западу тепло от нагревания океана Солнцем, где это тепло в значительной степени идет на поддержание конвективной активности над океаном, а часть его уходит вглубь в линзу субтропических теплых вод и проявляется в виде течений (Курисио) в северном полушарии и накопления тепла у западных берегов до возникновения Эль-Ниньо.
- При образовании мощных кучевых облаков в области конвективной активности водяной пар конденсируется в атмосфере, а скрытое тепло преобразуется в потенциальную энергию атмосферы и явное тепло.
- Конвективная активность достигает верхних слоев тропосферы, где переносится струйными течениями в субтропические и высокие широты, а там в результате медленного оседания и адиабатического сжатия воздуха потенциальная энергия преобразуется в явное тепло, которое удаляется из атмосферы посредством излучения в космос.

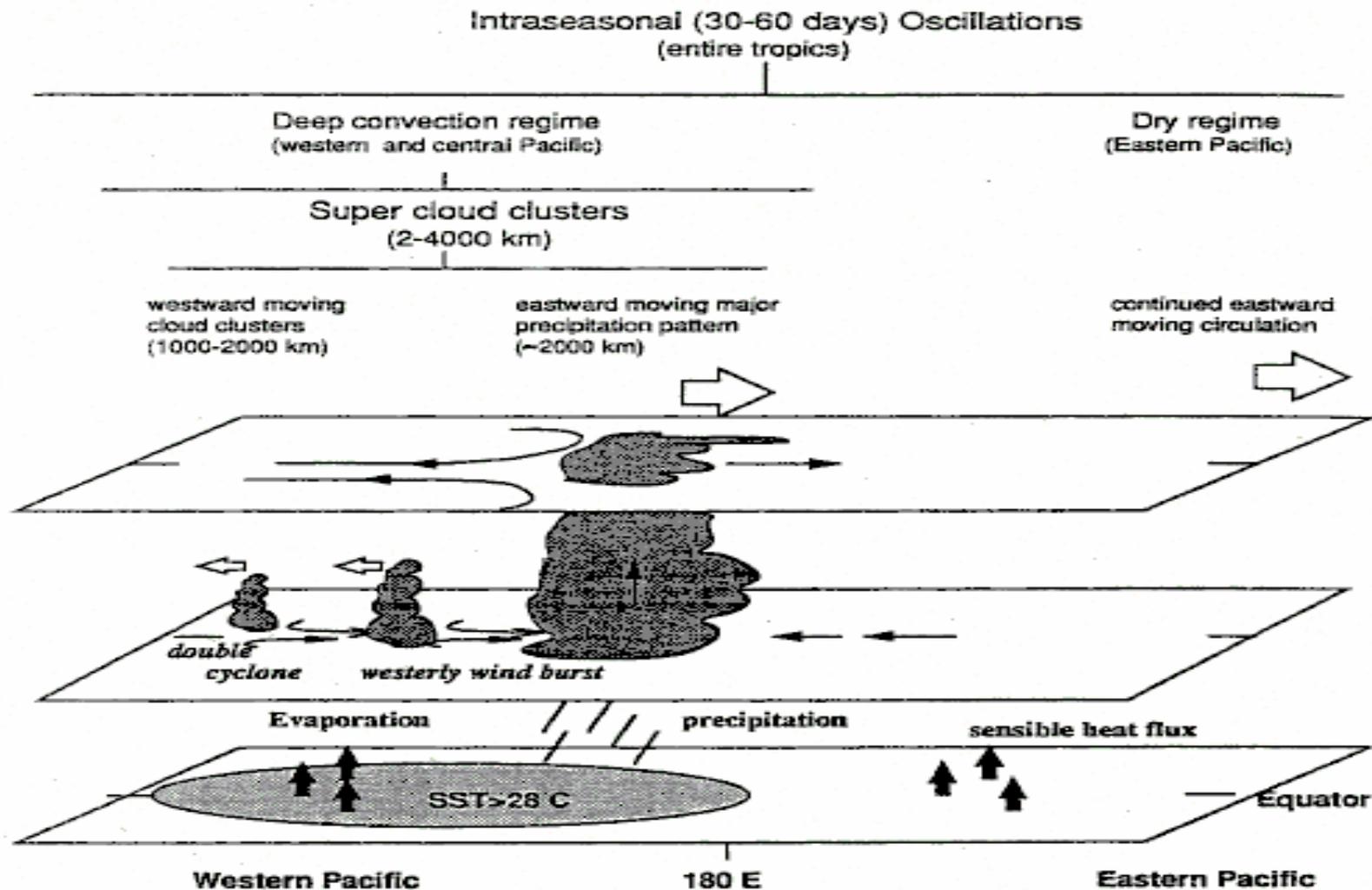
# Наступление Эль-Ниньо по данным спутниковой топографии водной поверхности (спутник TOPEX/Poseidon) с 14 июня по 7 августа 2002 г.



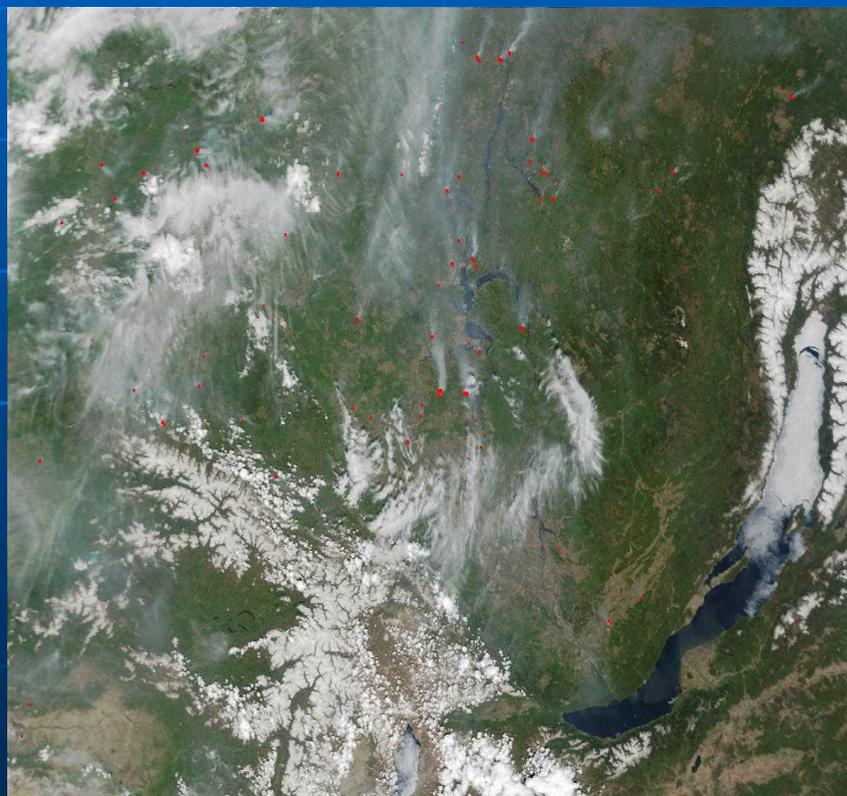
# Отличительные черты возникновения Эль-Ниньо

- Происходит только в тропических широтах южного полушария через каждые 3-7 лет при наличии сильной конвективной активности атмосферы в западной части акватории Тихого океана (основное состояние системы); для конвективной активности характерны суточные и (30-60)-суточные колебания (Madden-Julian intraseasonal oscillation).
- Начинается спонтанно (без видимого накопления энергетика в атмосфере и океане) в летние месяцы северного полушария и длится до конца текущего года, завершаясь в начале следующего года явлением Ла-Нина (переходное состояние системы, когда конвективная активность начинает превалировать над Индонезией).
- Возникающие аномалии температуры поверхности океана приводят к характерным колебаниям волновых процессов глобальной атмосферы.

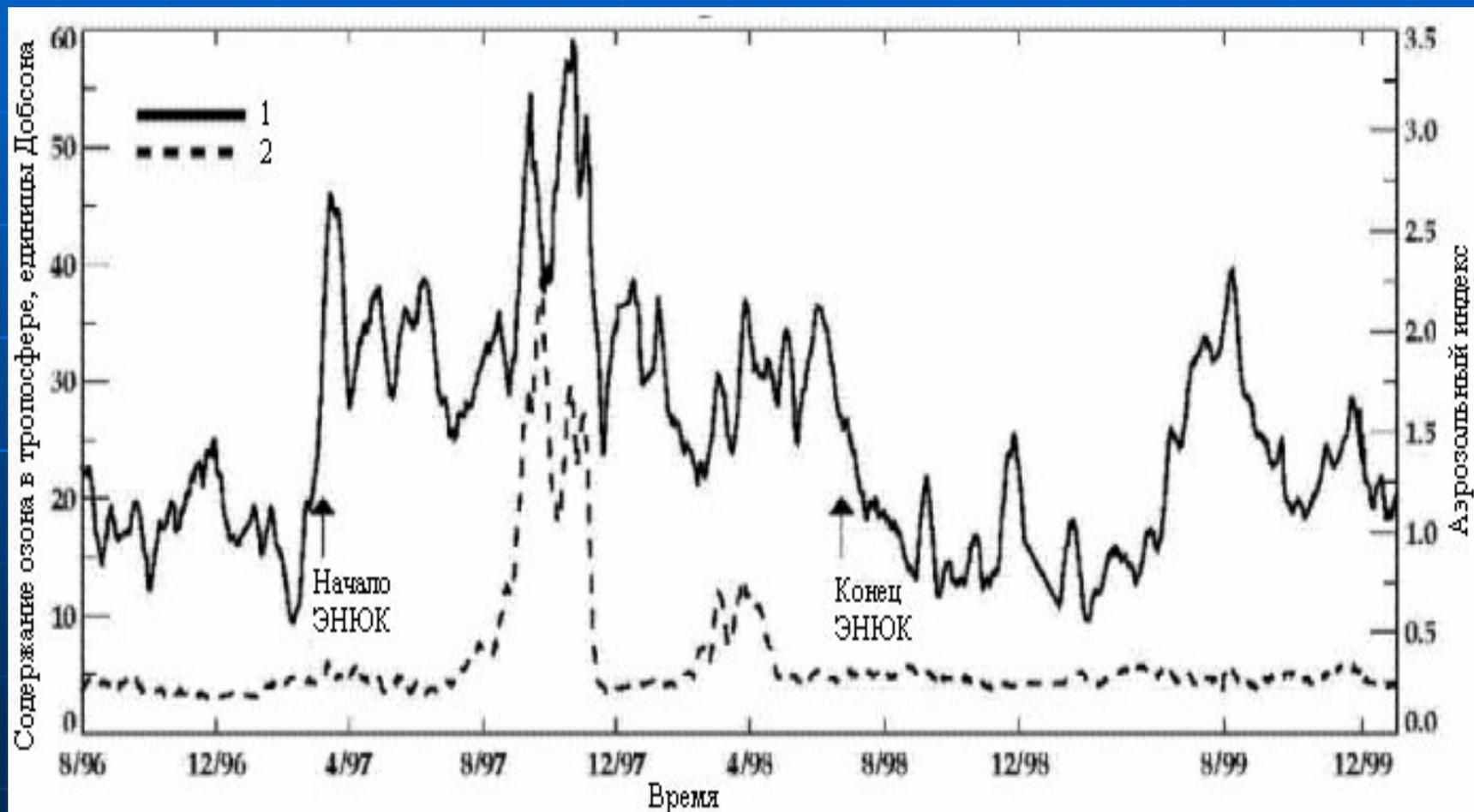
# Схема формирования сильной конвективной активности в атмосфере к западу от линии смены дат и последующего сдвоя западных пассатных ветров как предвестника наступления Эль-Ниньо



**Пожары над территорией Индонезии (спутниковая аппаратура AVHRR) и к западу от озера Байкал (аппаратура MODIS) в периоды наступления Эль-Ниньо**

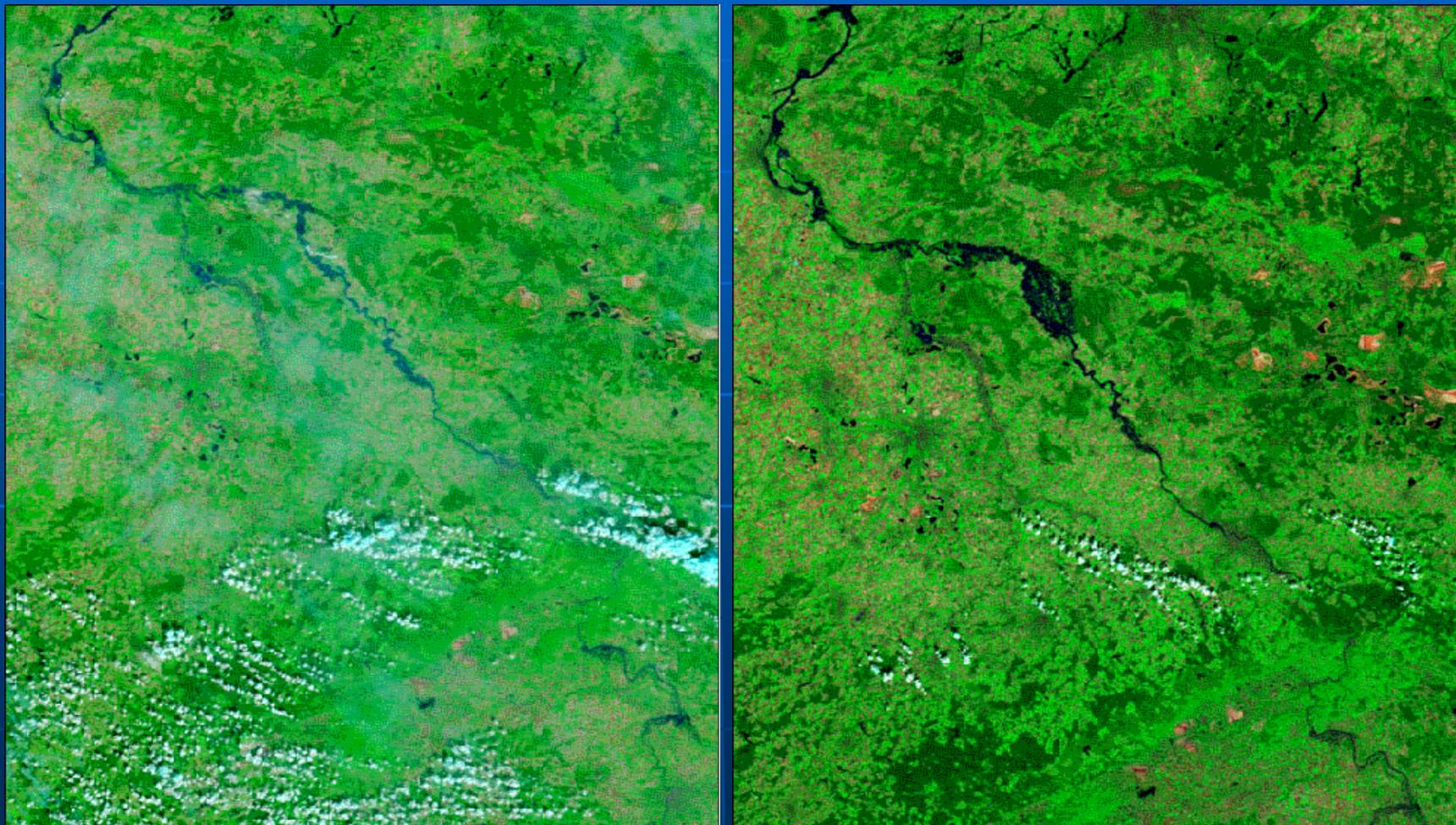


# Эль-Ниньо 1997-98 гг. в терминах общего содержания озона в атмосфере (спутниковая аппаратура TOMS) и аэрозольного индекса замутнения атмосферы по данным наземных наблюдений прозрачности для территории Индонезии

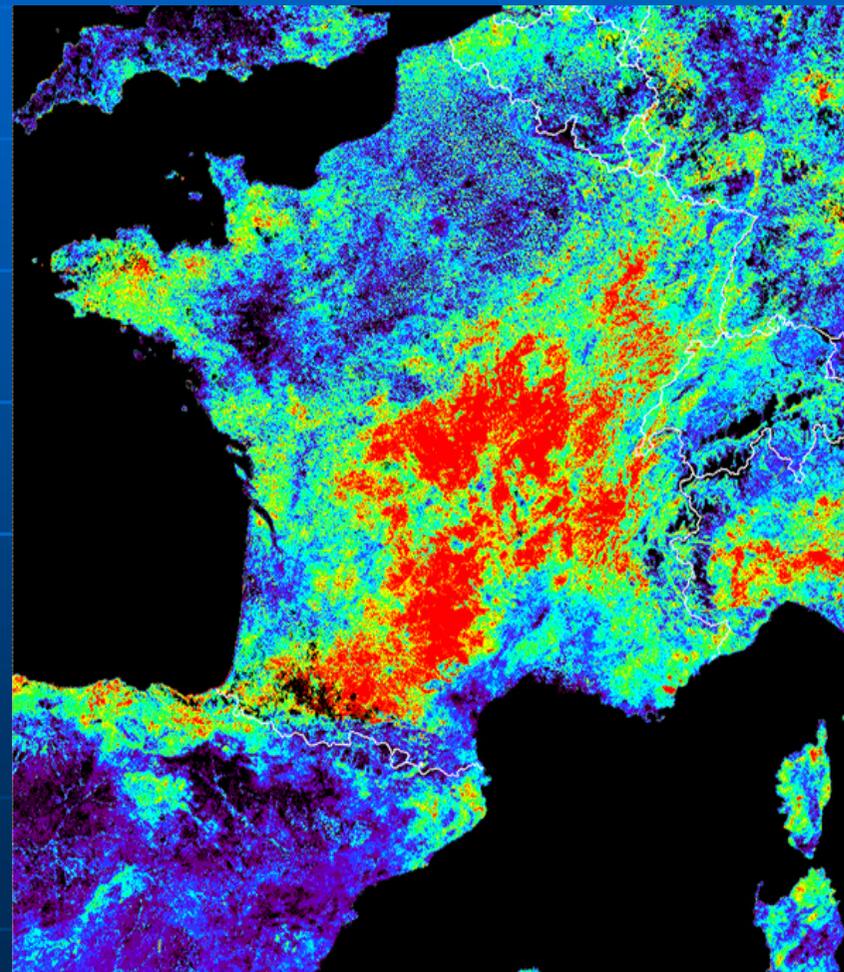
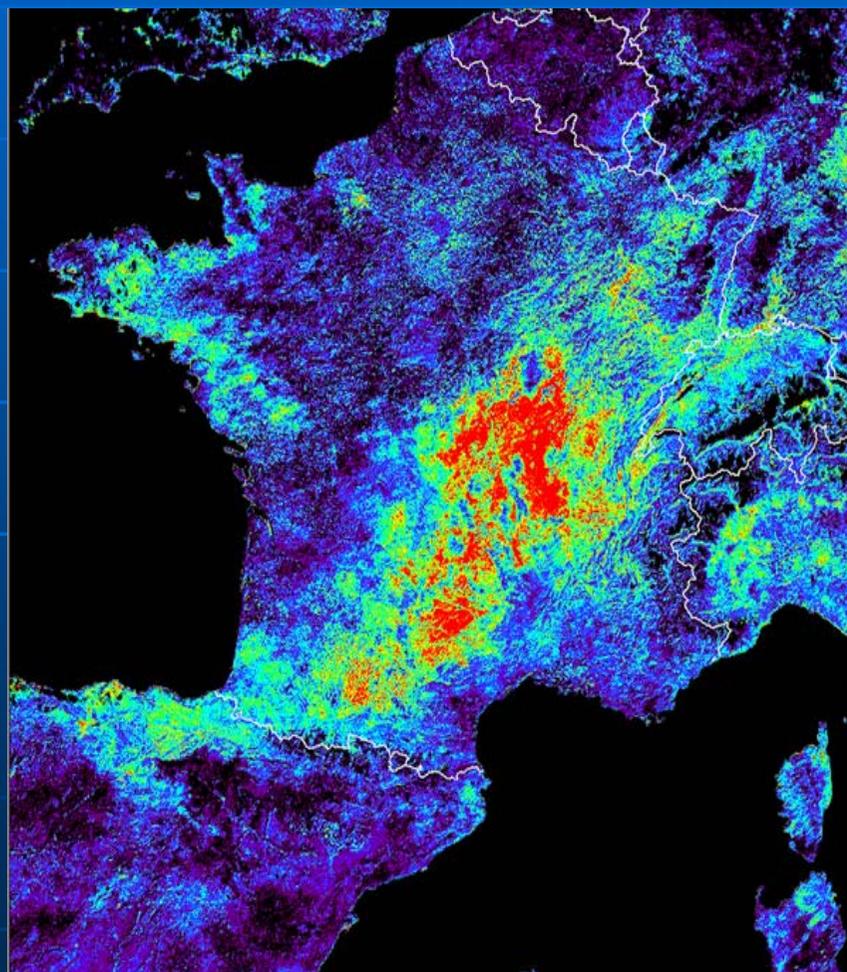


# Наводнение в Европе по данным аппаратуры MODIS спутника Terra

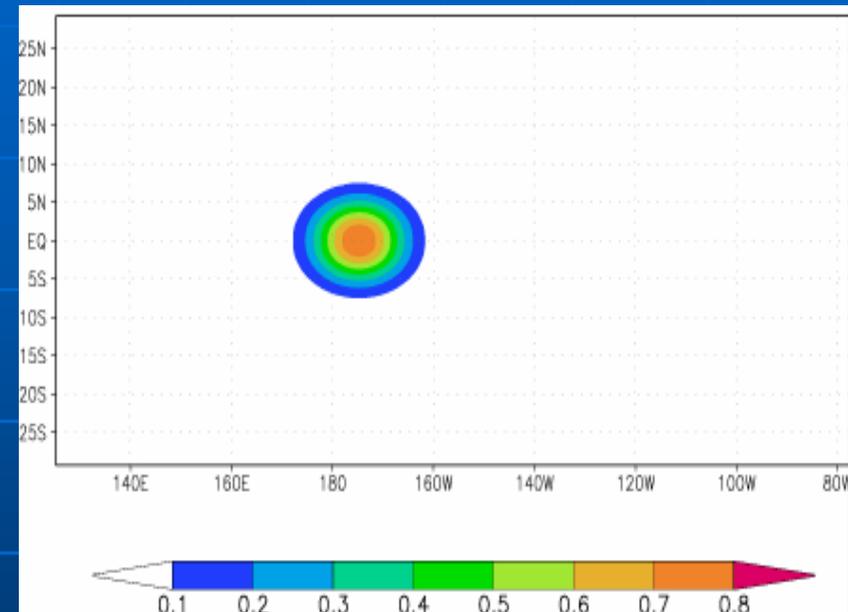
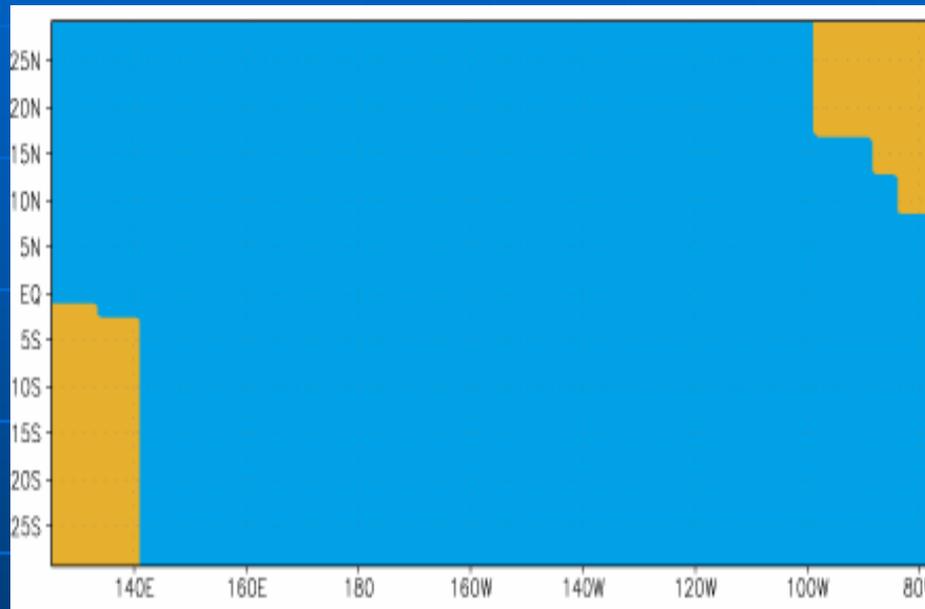
(река Эльба; 18 и 20 августа 2002 г.)



**Засуха в Западной Европе летом 2003 г. (слева – июль; справа – август) по данным спутника SPOT**

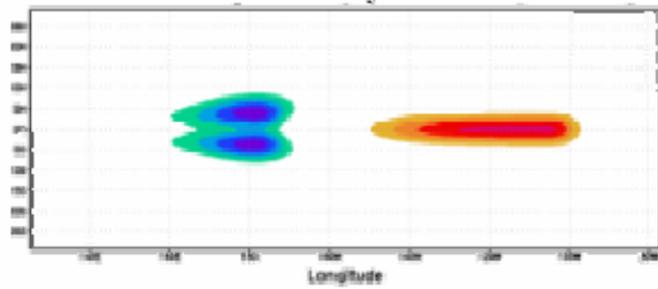


# Океанологическое объяснение условий возникновения Эль-Ниньо (сайт Международного исследовательского института предсказания климата <http://iri.columbia.edu/index.html>)

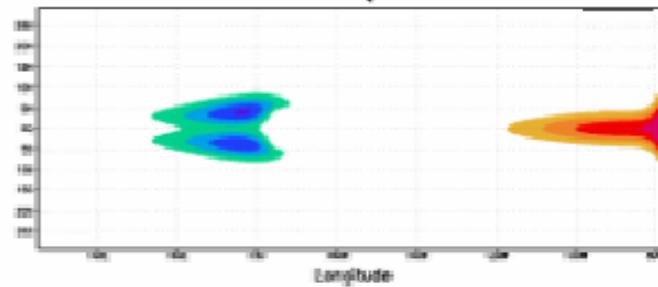


За счет ветрового натяжения в океане в восточном направлении по экватору уходит гравитационная волна Кельвина (скорость около  $2.9 \text{ м/сек}$ ), обусловленная колебаниями столба жидкости, а в западном направлении к северу и югу от экватора две волны Россби (скорость около  $0.93 \text{ м/сек}$ ), обусловленные изменением параметра Кориолиса от экватора к полюсам.

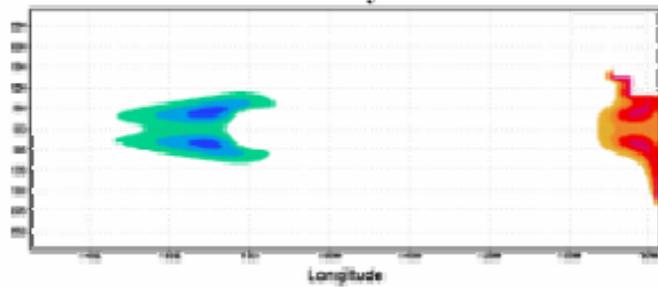
**Figure 6**  
25 days



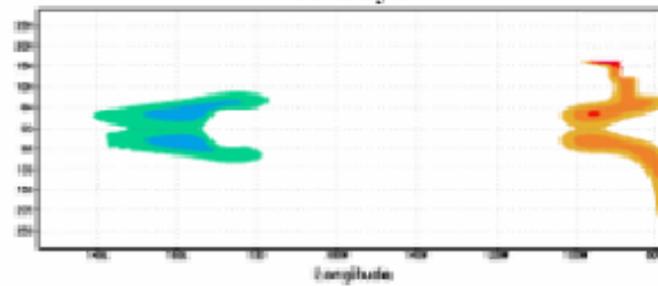
50 days



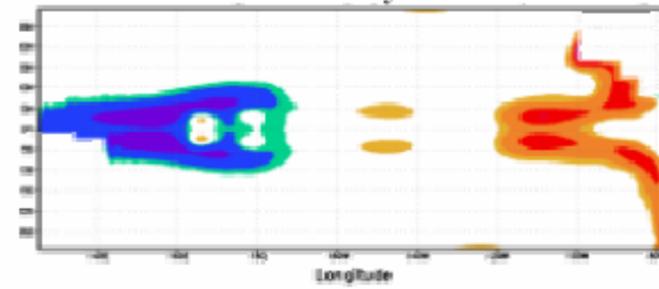
75 days



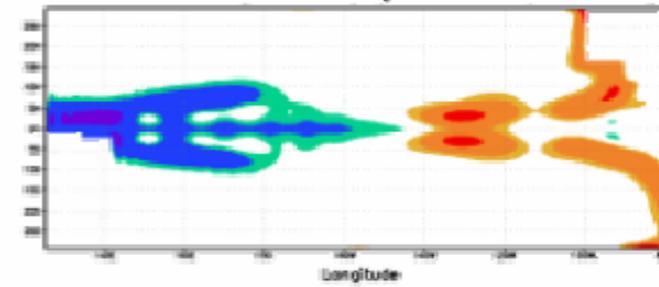
100 days



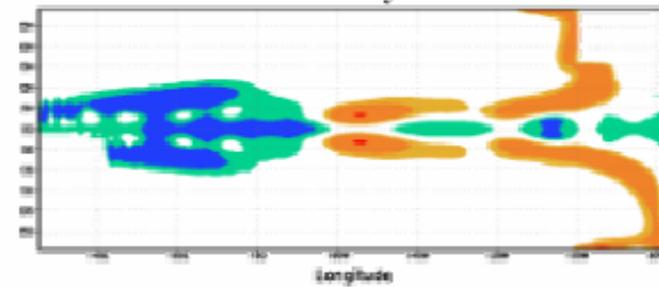
**Figure 7**  
125 days



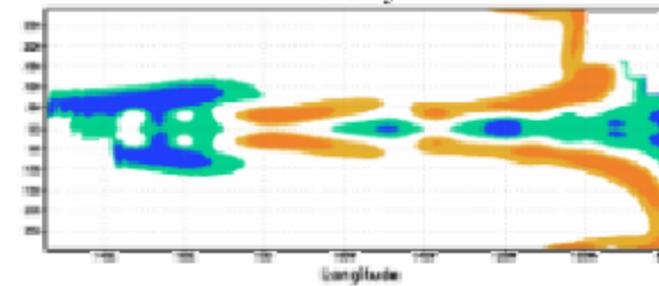
175 days



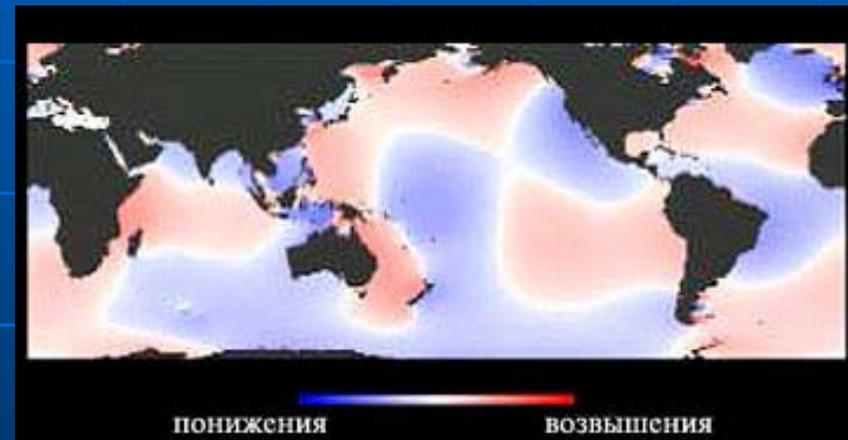
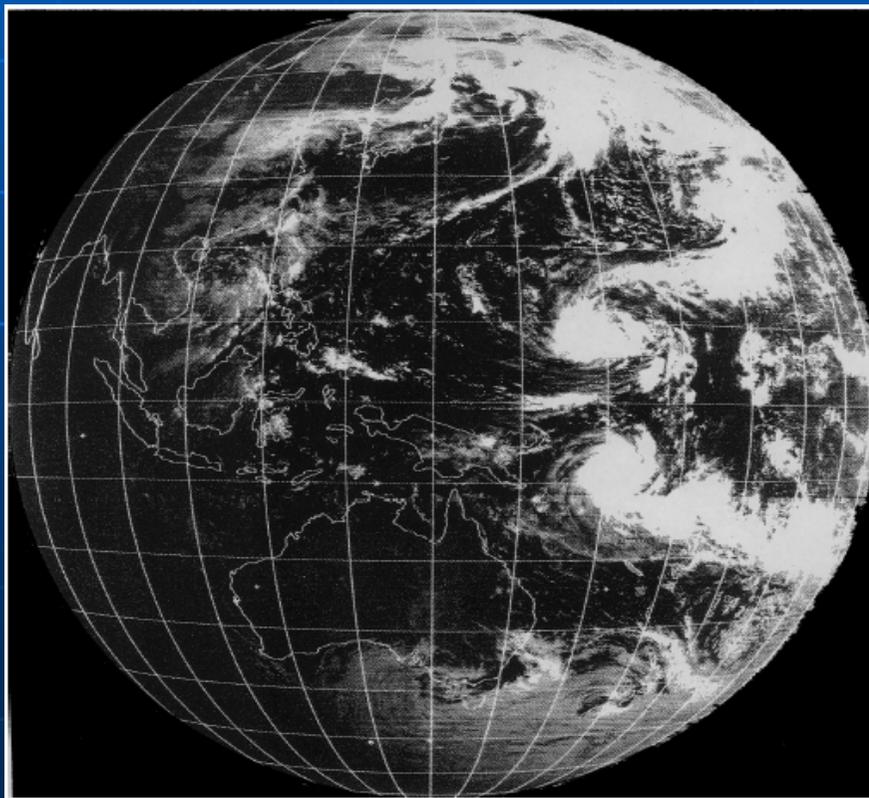
225 days



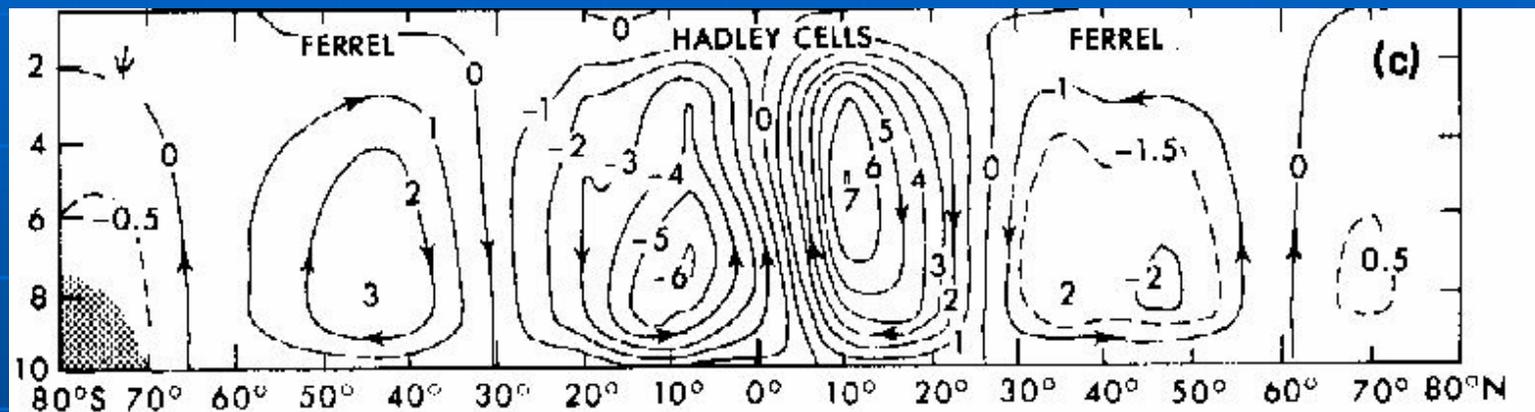
275 days



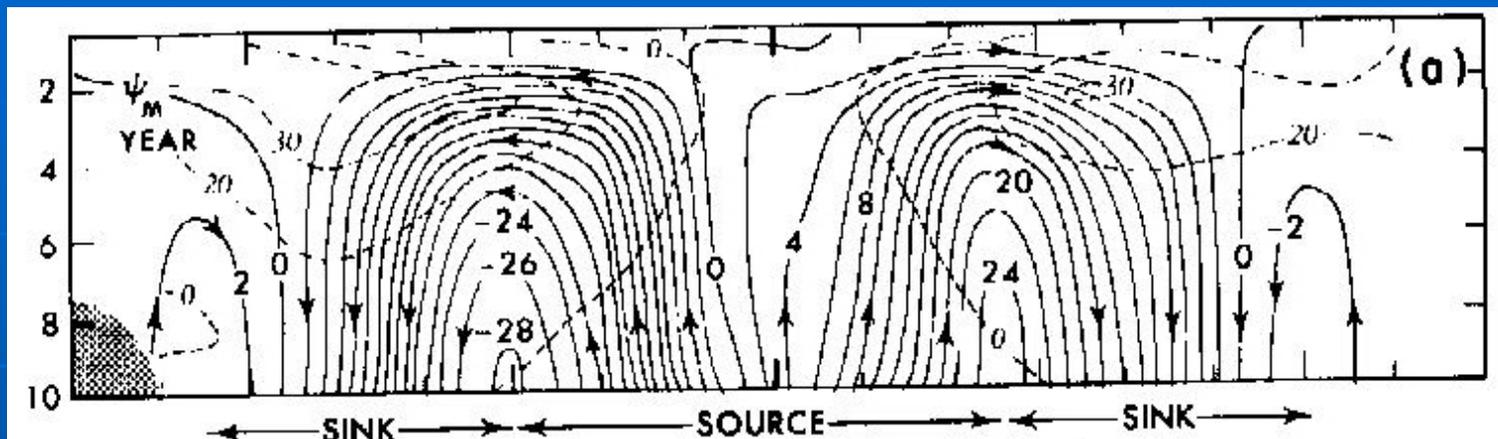
**Пример появления волн Россби (характерные скорости – десятки *м/сек*) в атмосфере в виде пары циклонов к северу и югу от экватора вдоль 160 в.д. (спутник GEOSAT, 18 мая 1986 г., Philander, 1990) и недостатки современных представлений об условиях возникновения Эль-Ниньо (нарушение равновесного состояния океанической системы)**



## Основные положения, касающиеся современных представлений о циркуляции атмосферы в терминах законов сохранения массы, момента количества движения и энергии (Peixoto & Oort, 1984)



Линии тока для «средних меридиональных циркуляций»: единицы  $10^{10}$  кг/сек для среднегодовых и зонально-усредненных условий при приравнении нулю среднего потока массы [ $\langle \rho v \rangle$ ],  $\rho$  - плотность среды,  $v$  - меридиональная компонента скорости ветра. В тропических широтах – ячейка Гадлея (Hadley): теплый (легкий и влажный) воздух в экваториальном регионе поднимается вверх и опускается в субтропиках в виде холодного и тяжелого воздуха (прямая тепловая циркуляция – производство кинетической энергии). В высоких широтах вверх поднимается сравнительно холодный воздух и опускается в средних широтах относительно теплый воздух, приводя к непрямой циркуляции, при которой холодный воздух должен принудительно подниматься вверх за счет поглощения кинетической энергии.



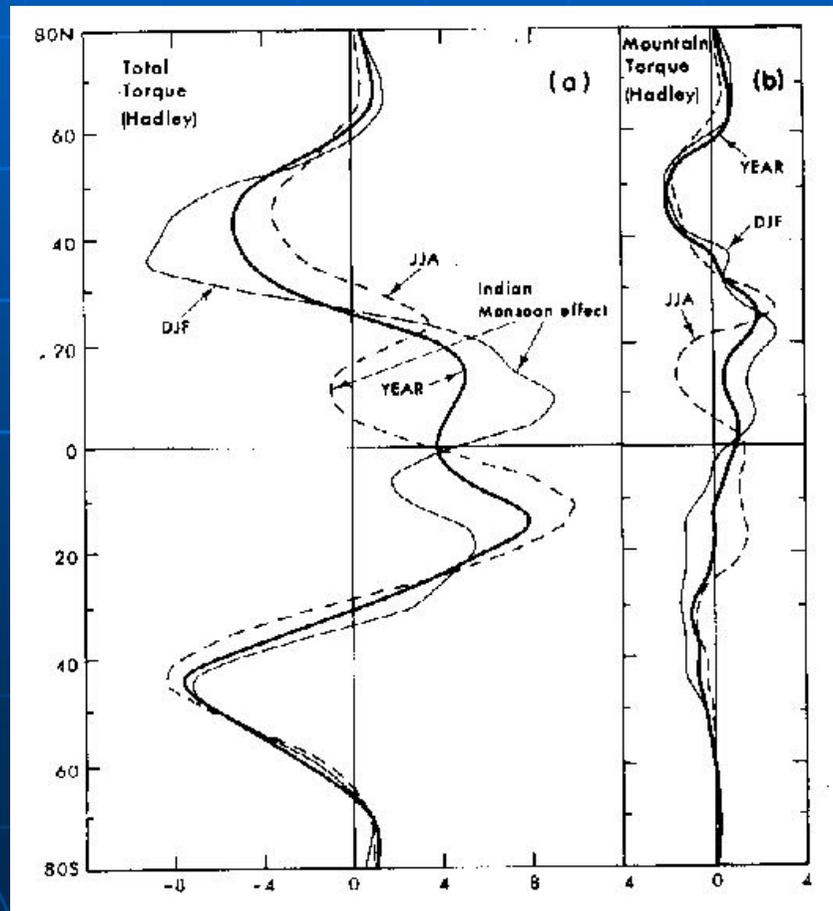
Зонально осредненные сечения потока относительного углового момента в атмосфере: единицы  $10^{18} \text{ кг (м/сек)}^2$ .

Абсолютный угловой момент единицы массы атмосферы  $M = \omega R^2 \cos^2 \varphi + u R \cos \varphi$ ,  $\omega$  - скорость вращения Земли,  $R$  - радиус Земли,  $u$  - зональная компонента скорости ветра,  $\varphi$  - географическая широта. Поскольку  $(\omega R = 464 \text{ м/сек})$  много больше  $u$ , то казалось бы, что в требуемом транспорте к северу и югу должен доминировать абсолютный угловой момент над меридиональным транспортом

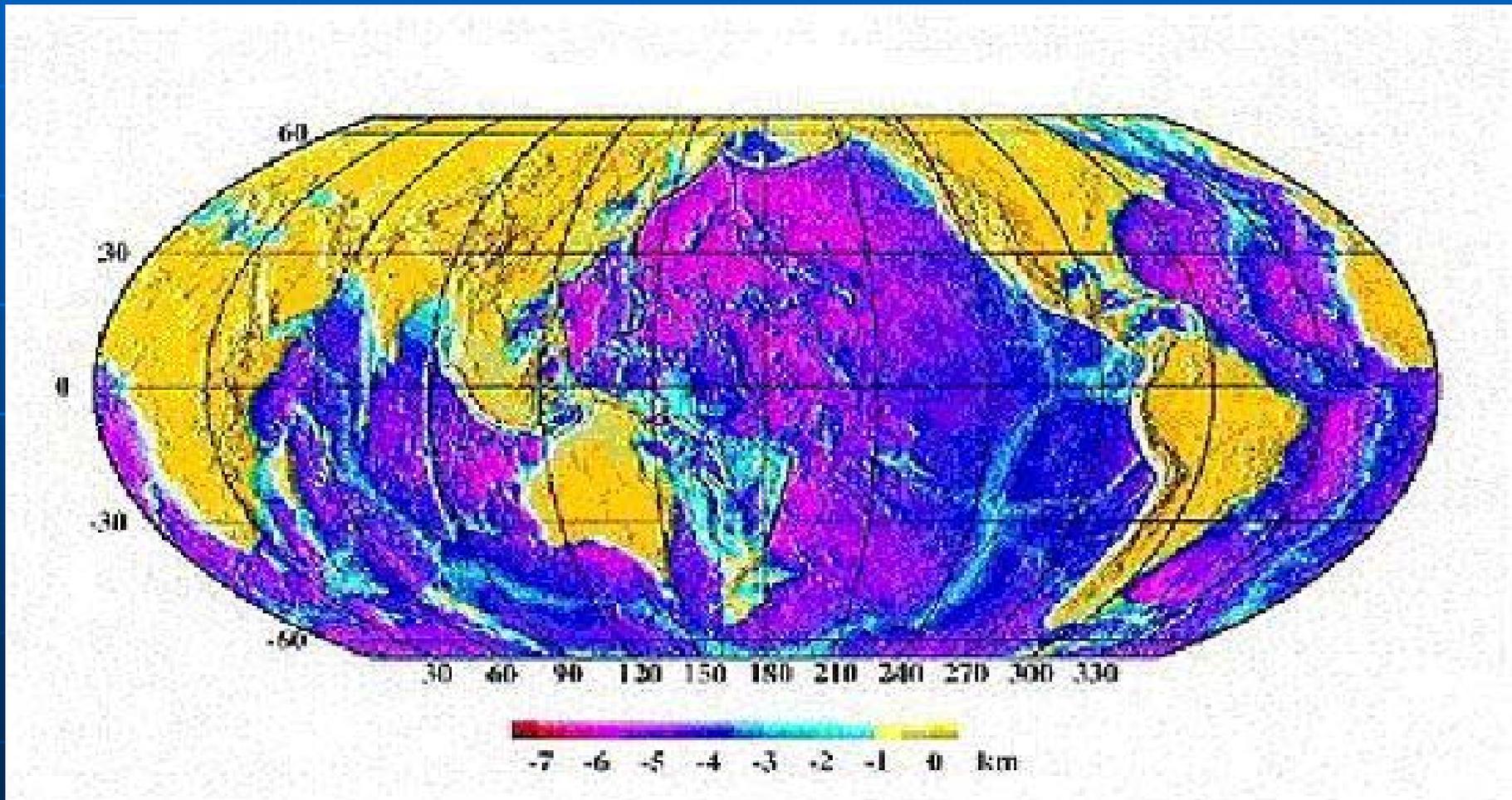
$$[\langle v M \rangle] = [\langle v \rangle] \omega R^2 \cos^2 \varphi + [\langle v u \rangle] R \cos \varphi.$$

Однако сохранение массы требует при долгопериодном осреднении, чтобы при осреднении по вертикали первого из записанных слагаемых обращалось в нуль, так что основную роль при таком осреднении играет именно второе слагаемое.

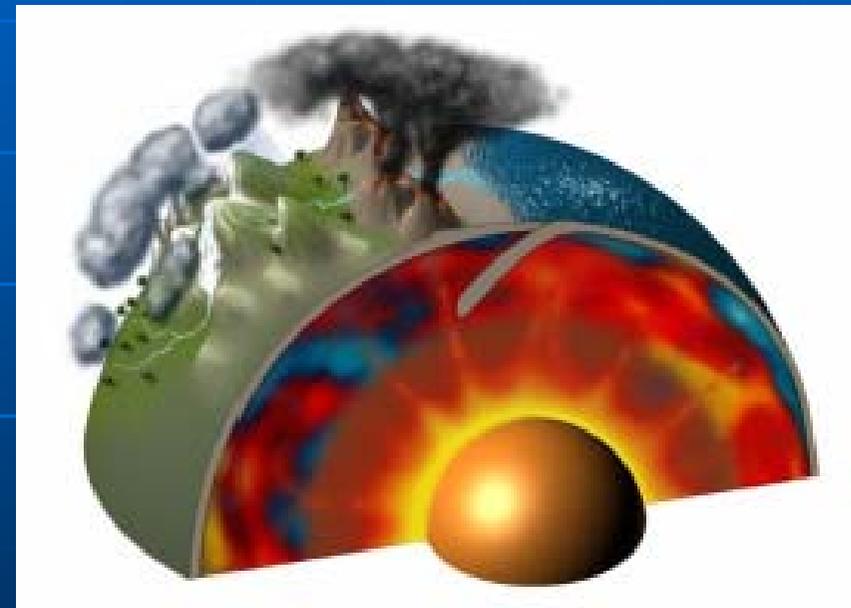
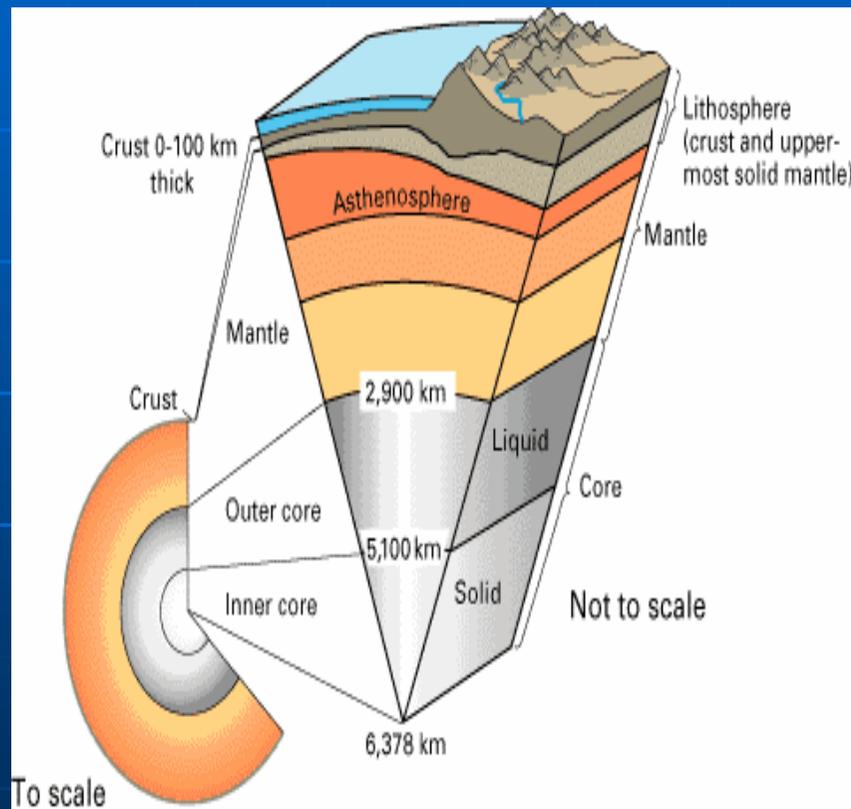
Среднезональные профили общей завихренности атмосферы вблизи земной поверхности за счет воздействия твердой Земли (океаны и поверхность суши) на атмосферу, которая получает импульс в восточном направлении от подстилающей поверхности в тропических широтах (положительные значения) и должна отдавать угловой момент количества движения в средних широтах (отрицательные значения). Отдача возможна спорадически, например, через высвобождение горизонтальных напряжений в зонах разломов земной коры типа Сан-Андреас в Калифорнии.



Данные спутниковой альтиметрии уровневной поверхности Мирового океана за 2000 год (видны подводные хребты, другие особенности строения дна океана).



# Строение отдельных оболочек Земли



# ИЗВЕСТНЫЕ (ИЗ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ И ДРУГИХ НАБЛЮДЕНИЙ) ФАКТЫ

- Твердая Земля представляет собой систему «вложенных сфер» (типа «матрешки»): твердое ядро; жидкое ядро; мантия; астеносфера; континентальная (толщина до 100 км) и океаническая (толщина до 10 км) кора с резкой границей Мохо в обоих случаях (толщина до 1 км).
- Континентальная кора сложена преимущественно гранитовыми структурами (образуются при сравнительно медленном остывании соответствующих пород), океаническая кора – преимущественно базальтовыми структурами (образуются при сравнительно быстром остывании пород). Различия между континентальной и океанической корой прослеживаются до глубин порядка 200 км.
- Содержание радиоактивных элементов в гранитах почти на порядок больше, чем в базальтах.
- Температура (Т) растет с глубиной и равна порядка 1000-1500 градусов на глубинах до 200 км. Плотность ( $\rho$ ) также возрастает, достигая на этих глубинах порядка 3 г/см<sup>3</sup>. Растет и давление с глубиной ( $p = \rho gh$ ,  $g$  - ускорение силы тяжести), достигая значений 10<sup>10</sup> г/(см сек<sup>2</sup>), т.е. 10 тысяч бар (1 бар = 10<sup>6</sup> г/(см сек<sup>2</sup>)) в среднем под континентальными плитами (средняя толщина  $h$  около 40 км) и приблизительно в 3 раза меньших значений под океаническими плитами (порядка 3 килобар), а для внутреннего ядра берут 3 Мегабара при плотности порядка 14 г/см<sup>3</sup>.

- Только при упругой реакции твердого тела на изменение достаточно малой и краткосрочной силы это тело испытывает деформации, которые в этом случае пропорциональны действующей силе; когда сила устраняется, тело возвращается в первоначальное состояние, а мерой деформации служит напряжение, т.е. сила на единицу площади. Внутри Земли напряженно-деформированное состояние системы проявляется при землетрясениях, в которых может заключаться энергия вплоть до  $10^{25}$ – $10^{26}$  эрг = [г см<sup>2</sup> /сек<sup>2</sup>].
- Вязкость среды является мерой неупругости и обусловлена ползучестью вещества в поликристаллических материалах горных пород (в частности, в астеносфере при приближении к точке плавления). Оказалось, что вязкость имеет минимум на глубинах 200-300 км, для которых часто коэффициент динамической вязкости берут равным  $10^{24}$  пуаз = [г/(см сек)]. В вязкой среде происходит диссипация энергии, т.е. среда нагревается при смещениях за счет вязкого трения. Для изучения затухания колебаний кристаллической решетки при рассеянии энергии на соответствующих структурах рассматривают дислокации, их возможный отрыв от точечных дефектов структуры и движение по кристаллической решетке, а также вязкое скольжение по границам зерен.
- Скорость распространения продольных (упругих) волн в мантии растет с глубиной более, чем в 1.5 раза (от 8 км/с до 13.5 км/с), затем скачком убывает до значений около 8 км/с на границе «мантия – жидкое ядро», затем снова возрастает, но слабее, чем в мантии, и снова скачком убывает на границе «жидкое – твердое ядро». Скорость распространения поперечных волн в мантии также возрастает с глубиной от приблизительно 4 км/с до 7 км/с, а далее эти волны полностью затухают.
- Магнитное поле на поверхности Земли равно около  $0.5$  гс = [г<sup>1/2</sup>/(см<sup>1/2</sup> сек)]. Южный магнитный полюс достаточно быстро смещается (отошел на расстояние более 1000 км за последние около 150 лет) от Антарктиды в Индийский океан.

## ФАКТЫ, ТРЕБУЮЩИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОБЪЯСНЕНИЙ

- Нет четких доказательств существования конвективных ячеек в мантии (типа известной конвекции Бенара), поскольку: а) полные уравнения гидродинамики неприменимы к верхней мантии вследствие зависимости вязкости от напряжений из-за эффектов переползания дислокаций и скольжения по границам зерен; б) изменения вязкости с глубиной вследствие ее зависимости от температуры и давления; в) верхняя граница циркуляционной системы (земная кора) не является гладкой, имеются поднятия и смещения пластов при горообразовании и других аналогичных процессах.
- Приближенное равенство теплового потока из внутренних слоев Земли на континентах и океанах наводит на мысль, что существуют приблизительно одинаковые источники тепла в соответствующих вертикальных разрезах, горизонтальное перемещение этих источников очень мало.
- Не ясен механизм образования и дрейфа континентов (трудно представить себе глыбу толщиной до 200 км, которая перемещается в более плотной среде).

# Новые предположения и оценки

Если для объяснения кинематики литосферных плит использовать традиционное гидродинамическое приближение, то вязкость среды астеносферы служит сдерживающим фактором для отсутствия погружения этих плит в мантию Земли, а движущей силой их перемещения является конвекция в мантии.

Если же астеносфера – это плазменное состояние вещества, то магнитно-гидродинамическое (МГД) приближение выходит на первый план; главным фактором смещения плит становится искривление силовых линий магнитного поля, берущего свое начало из гиромagnetизма (вращения Земли) и схемы «самоподдерживающего динамо»; искривление силовых линий («жестких обручей») создает «противодавление» плазмы, которое удерживает плиты в равновесии с более глубокими слоями Земли. Возмущения распространяются вдоль силовых линий со скоростью  $c_A = [B^2/(4\pi\rho)]^{1/2}$ ,  $B$  - магнитная индукция, плотность среды  $\rho$ .

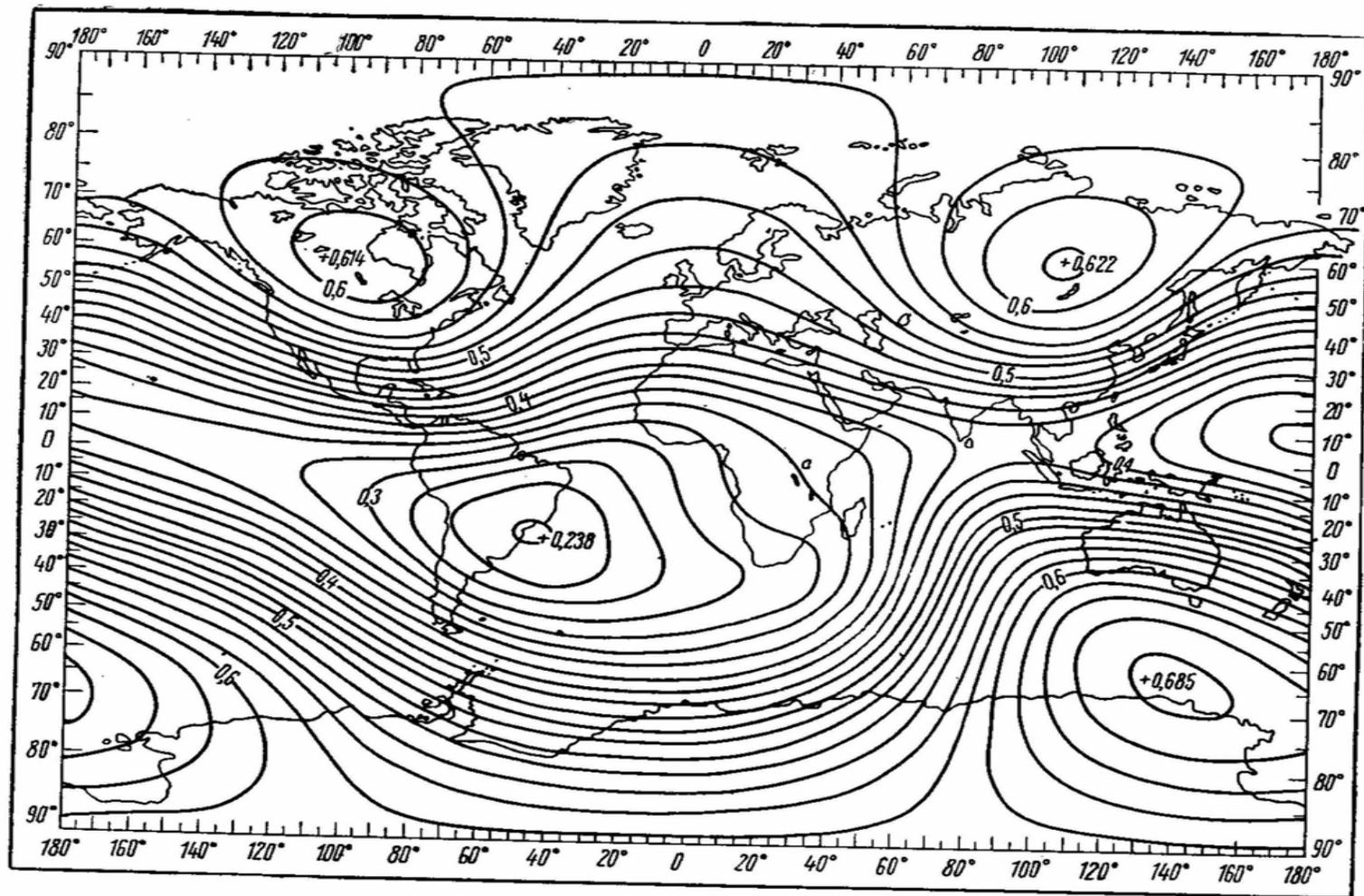
Задача – построение адекватных моделей геодинамо.

# МАГНИТНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ

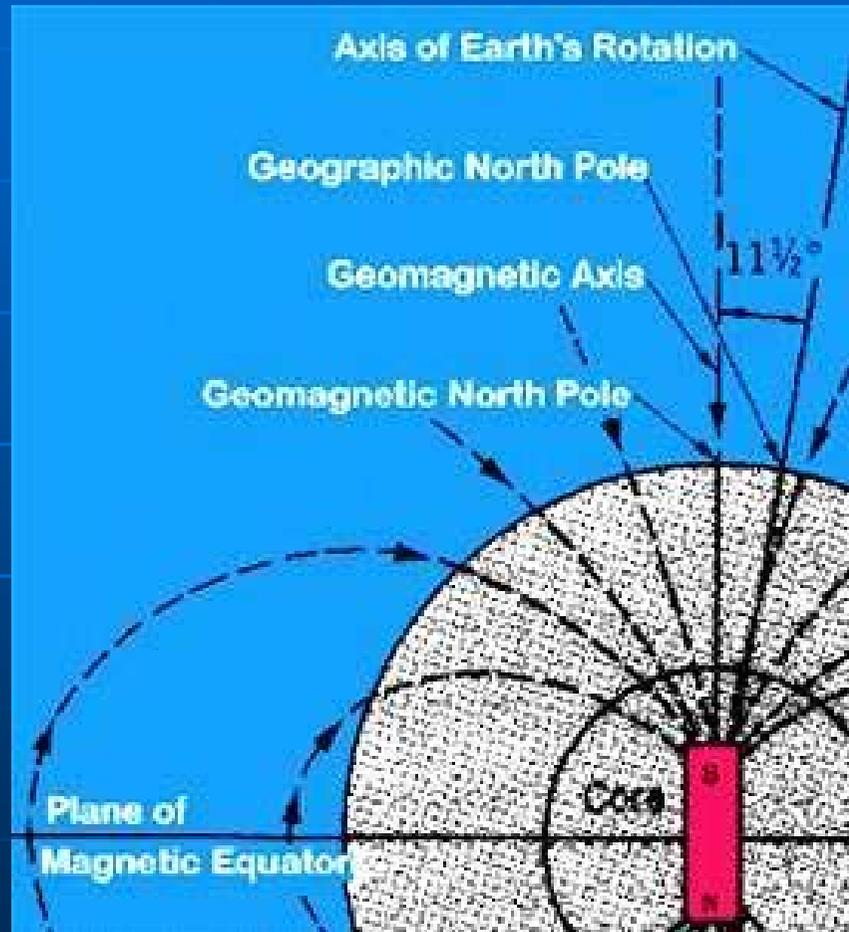
## *Основные предположения*

1. За счет натяжения магнитных силовых линий в проводящей среде астеносферы под плитой Наска возникают длинопериодные поперечные волны (в меридиональном направлении)
2. При прохождении очередной впадины такой волны плита Наска опускается, что при подъеме уровня океана летом в западной части тропических широт Тихого океана (типичные значения 10-15 см) дает начало Эль-Ниньо

Задача – оценить величины индукции магнитного поля под плитой Наска, при которых возможны соответствующие эффекты

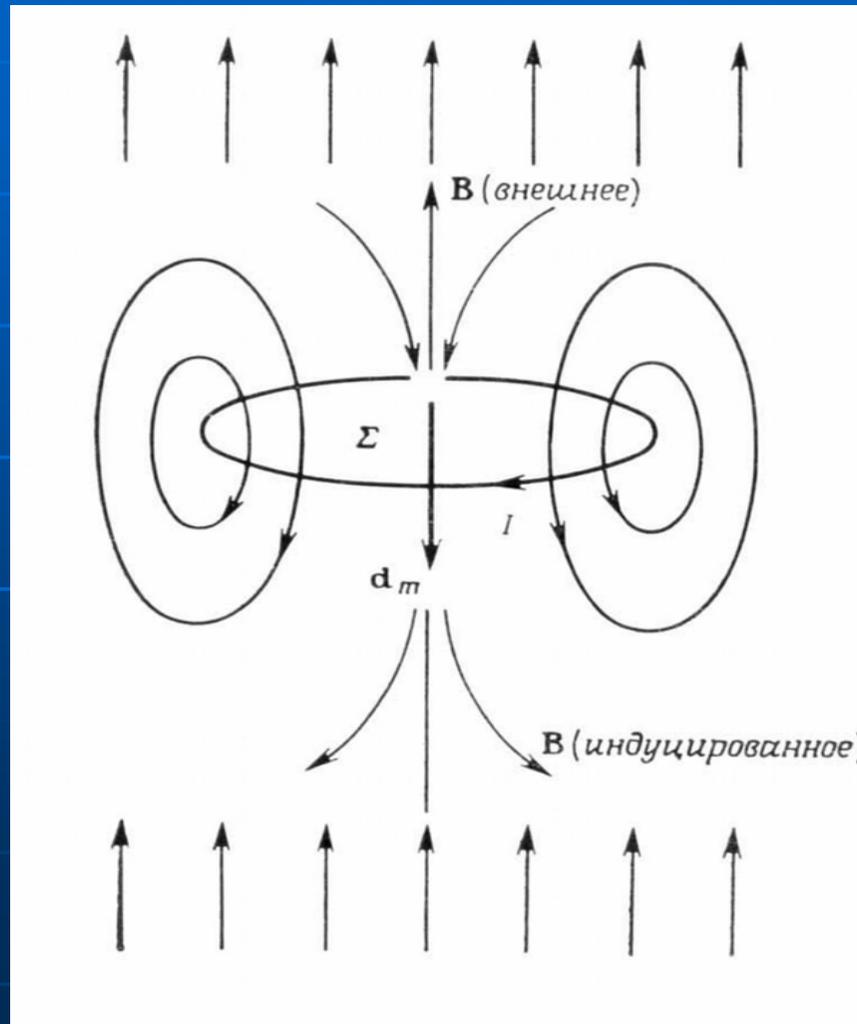


## Этапы получения оценок



- Источник – вращение Земли, гиромagnetизм, намагничивание «стержня»
- В жидком ядре возникает индуцированное магнитное поле

Картина индуцированного магнитного поля для диамагнетика  
 $d_m = - (m \nu_{\perp}^2 / 2) n$ ,  $n$  - единичный вектор в направлении  $B$ .



## Известные особенности изменения магнитного поля, формируемого в жидком ядре Земли

- Вековой западный дрейф, что можно увязать с превышением скорости вращения прецессирующего «тангенциального цилиндра» (его основания характеризуют области максимальной крутизны силовых линий магнитного поля)
- Инструментальные наблюдения показывают, что южный магнитный полюс стремительно удаляется от южного географического полюса и сейчас находится в Индийском океане, пройдя расстояние более 1000 км за последние около 150 лет.

# Модели самоподдерживающегося геодинамо.

Наиболее правдоподобные оценки магнитного поля на границе «жидкое ядро – мантия» -  $500 \text{ Гс}$ :

- Glatzmaier & Roberts. 3D modeling of the Earth's dynamo. <http://ScientificAmerican.com>
- Проведенные исследования показали, что ослабление этого поля в слое астеносферы приводит к значению магнитной индукции на верхней его границе под плитой Наска около  $15 \text{ Гс}$ , что соответствует скорости распространения поперечных волн в астеносфере под этой плитой  $c_A = 3 \text{ см/сек}$ , а при характерном размере плиты около  $3500 \text{ км}$  их период составляет 3-4 года (минимальное время проявления Эль-Ниньо).

# Выводы

- Анализ временных рядов спутниковых наблюдений в видимой, инфракрасной и микроволновой областях спектра открывает новые возможности построения информационно-динамических моделей описания процессов в атмосфере, гидросфере, литосфере.
- Показаны примеры использования спутниковых наблюдений для изучения влияния аномалий геофизических процессов в тропических широтах Тихого океана на погодно-климатические аномалии в других частях земного шара.
- Перспективы развития геофизических приложений видятся в совместном использовании данных космического мониторинга и моделирования процессов в отдельных оболочках Земли.