

ГЕО-ТЕХНОЛОГИИ

«Кто не заглядывает далеко, того ждут близкие беды»
Древняя мудрость

Радиационный баланс и чувствительность климата Земли: диагностика и геопроектирование

В.А. Головки

ВОСЬМАЯ ОТКРЫТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса
Москва, 18 ноября 2010 г.

Содержание презентации

■ Актуальность рассматриваемых проблем

- ◆ Рост глобальной приземной температуры
- ◆ Климатическая катастрофа в полярных регионах
- ◆ Рост теплосодержания верхнего слоя океана

■ Космический мониторинг РБЗ

- ◆ Точность измерений составляющих РБЗ
- ◆ Текущие значения составляющих РБЗ
- ◆ Мониторинг интегральной солнечной постоянной

■ Чувствительность климата Земли

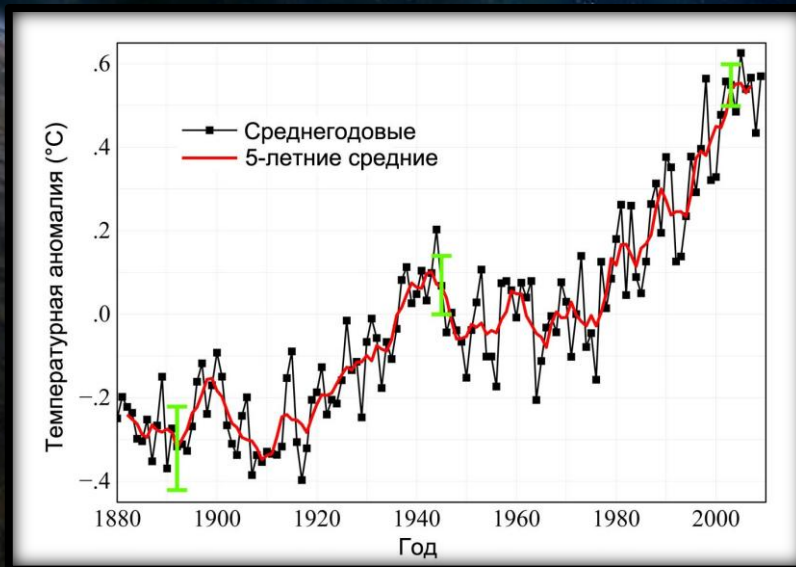
- ◆ Оценка чувствительности климата по данным РБЗ
- ◆ Линейный подход к оценке чувствительности
- ◆ Нелинейная корректная оценка чувствительности

■ Технологии геопроектирования

- ◆ Современное состояние технологий
- ◆ Новые инновационные подходы



Актуальность геопроектирования



Изменение радиационного баланса Земли (РБЗ), которое называют радиационным форсингом, является основным фактором, определяющим динамику планетарной климатической системы

Наблюдающиеся в последние десятилетия аномально высокие темпы потепления климата делают актуальными исследования, связанные с перспективными технологиями формирования отрицательного радиационного форсинга («антифорсинга»).

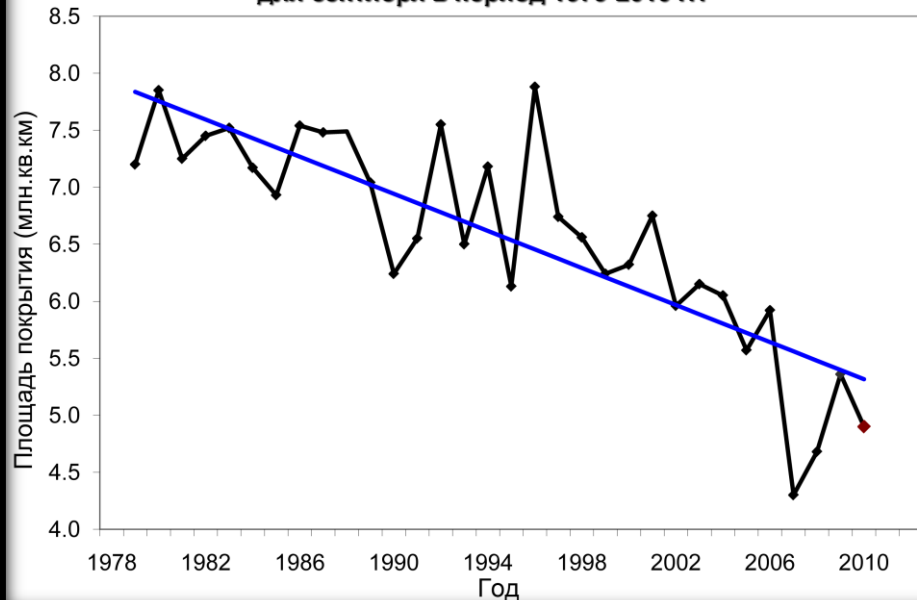
Такие подходы, которые в будущем могут быть реализованы в виде прикладных технологий, можно характеризовать термином «геопроектирование».

В последнее время серьезно рассматривается несколько идей активных воздействий на окружающую среду (геопроектирования) с целью искусственной коррекции составляющих РБЗ.

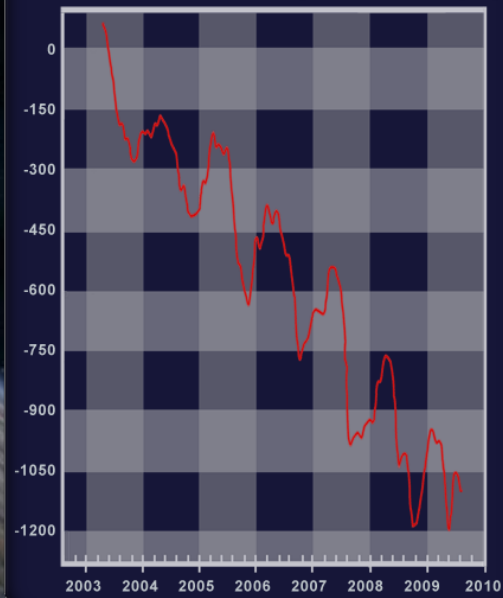


Климатическая катастрофа в Арктике

Среднемесячные значения покрытия арктическими морскими льдами для сентября в период 1979-2010 гг.



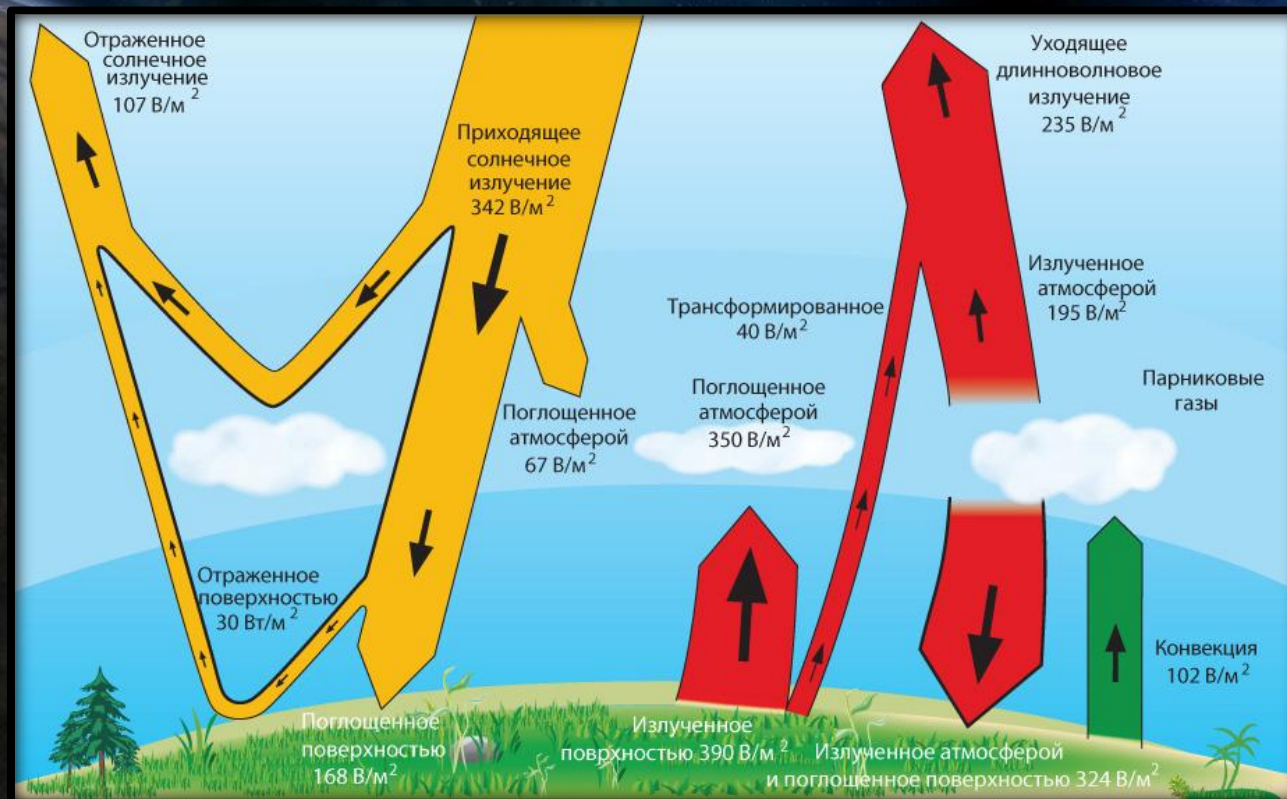
Изменение массы Гренландии (Гт)



Важность проявлений последствий потепления климата:
уменьшение ледяного покрова в Арктике,
таяние ледников в Гренландии,
исчезновение ледников в Гималаях,
крушение гигантских айсбергов в Антарктике,
повышение уровня Мирового океана и т.д.



Радиационный баланс Земли



$$N = Q(1 - A) - L,$$

где Q – приходящая солнечная радиация (ПСР), определяемая солнечной постоянной S_0 , ($Q = S_0/4$)

A – альbedo Земли;

L – уходящая длинноволновая радиация (УДР).

QA определяет уходящую коротковолновую радиацию (УКР).

В настоящее время текущие глобальные средние значения:
для ПСР – 341.3 Вт/м^2 ,
составляющие РБЗ, полученные на основе измерений аппаратурой CERES,
для УКР – 99.9 Вт/м^2 , соответствующее альbedo A – 0.293,
для УДР – 238.3 Вт/м^2 ,
что заметно отличается от данных, полученных ранее с помощью ERBE и CRRБ
(УКР – 107 Вт/м^2 , УДР – 234 Вт/м^2).

В.А.Головко " Радиационный баланс и чувствительность климата Земли"

Точность измерения составляющих РБЗ



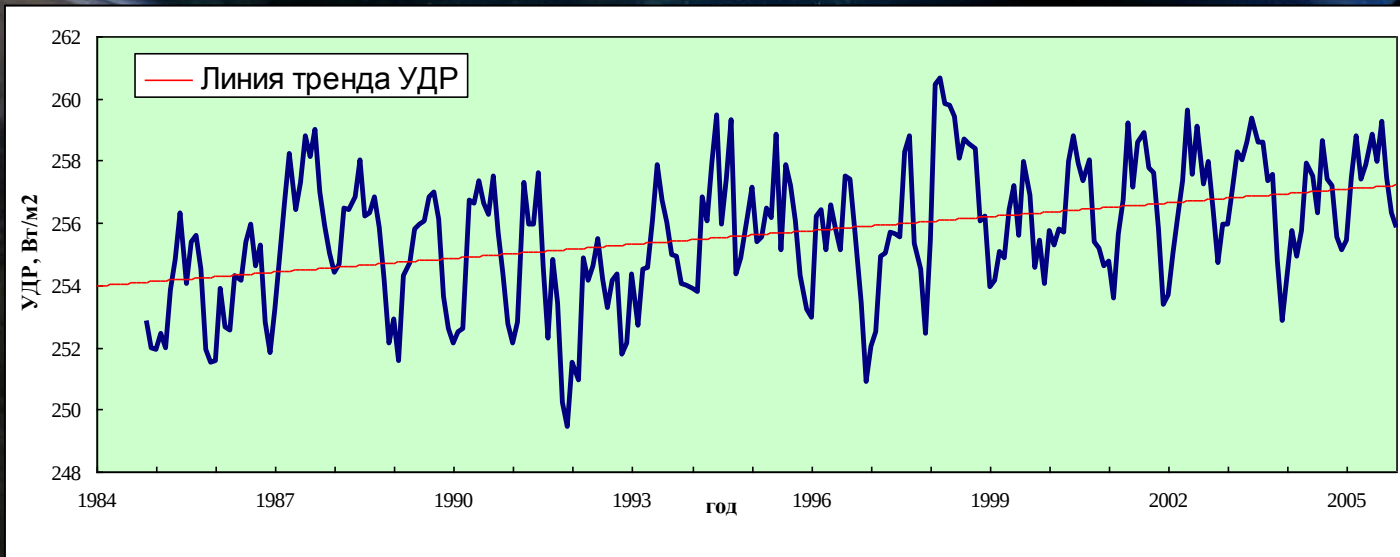
- Проблема необходимой точности измерений ещё не решена!
- Величина РБЗ достаточно мала и может быть менее 1 Вт/м², а знать мы её должны с точностью до долей, вычисляя на основе спутниковых измерений как разность двух достаточно больших величин (около 340 Вт/м²)
- Даже для точности измерений CERES 0.2% мы получаем оценку (при УКР~100 Вт/м², УДР~240 Вт/м²):

$$\sqrt{0.2^2 + 0.48^2} = 0.52 \quad \text{т.е. около } 0.5 \text{ Вт/м}^2$$

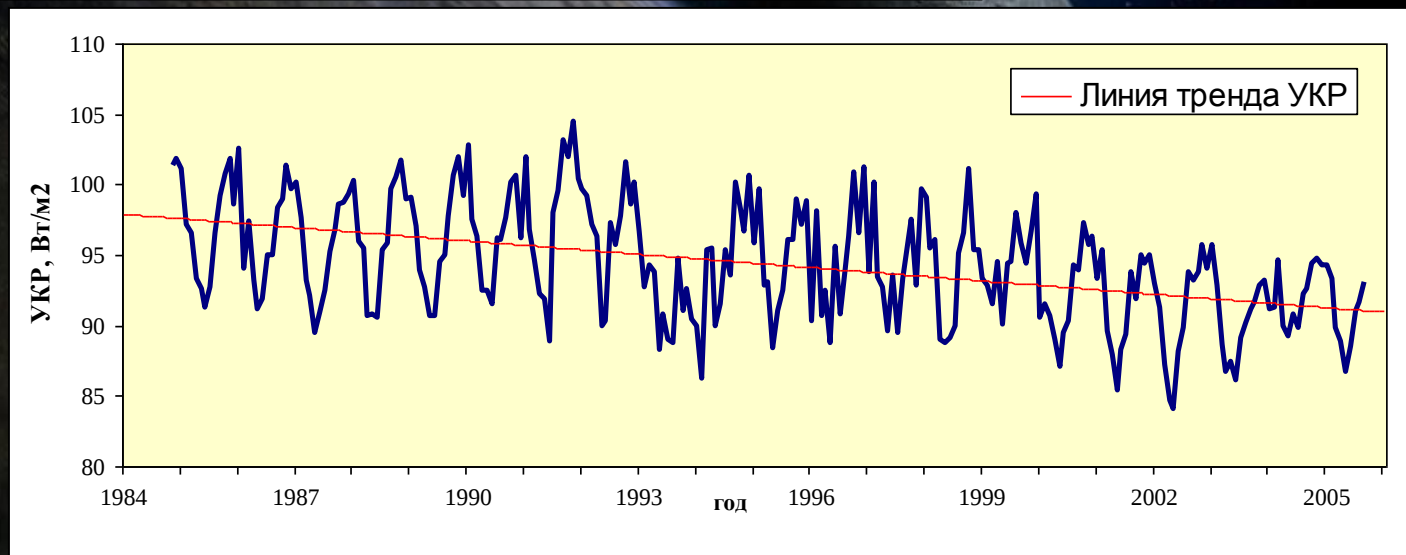
Параметр (Вт/м ²)	Ансамблевое среднее	Абсолютное СКО (1σ)	Относительное СКО (1σ)	Доверительный интервал
ПСР	341.3	0.7	0.2%	340.0 - 341.8
УДР	238.3	1.8	0.8%	235.6 - 240.5
УКР	99.9	3.2	3.2%	96.6 - 105.2
РБЗ	3.2	3.2	100.0%	-0.4 - 7.0



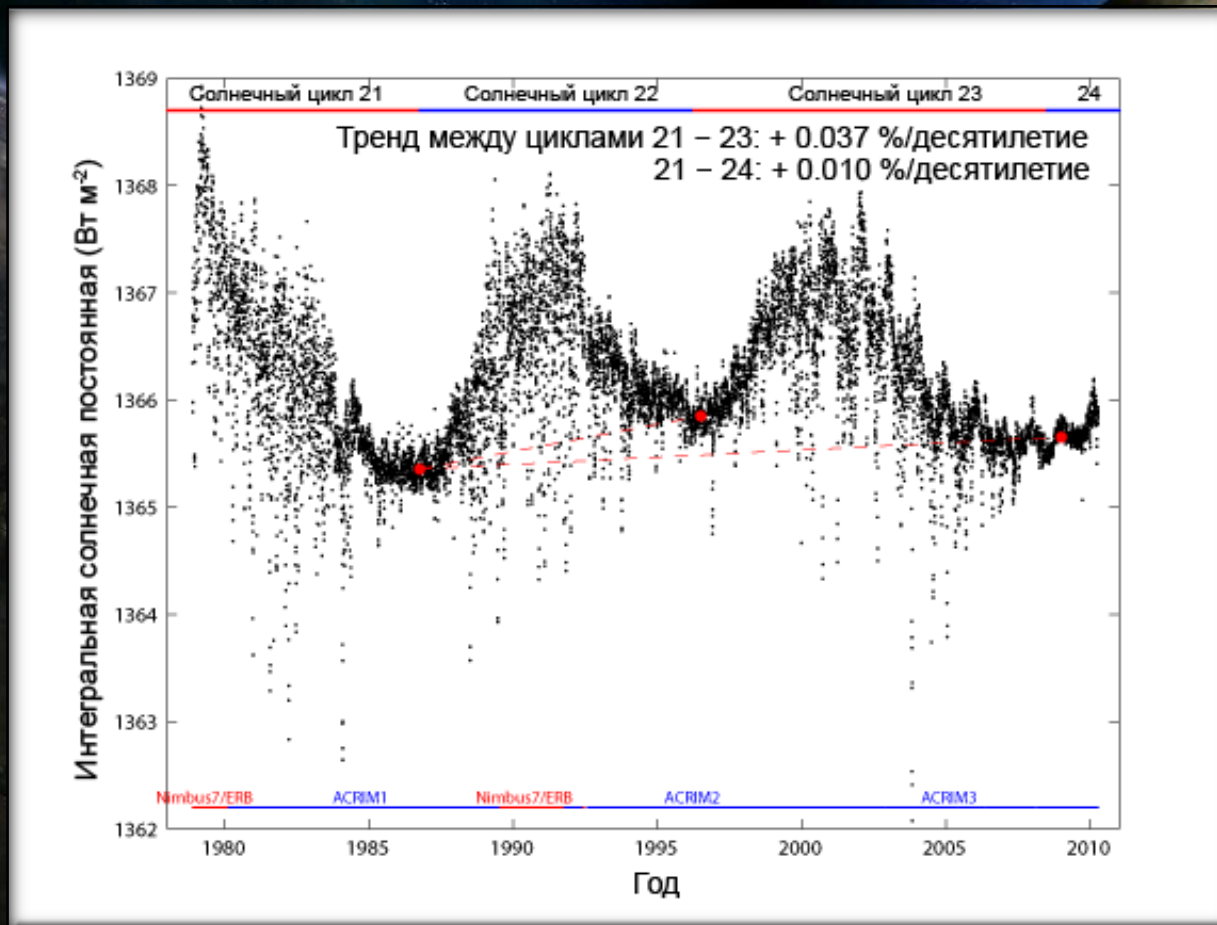
Временные тренды уходящей радиации



Аномалия УДР: +1,5
Аномалия УКР: -3,2
Баланс: +1,7
(нагрев)



Интегральная солнечная «постоянная»

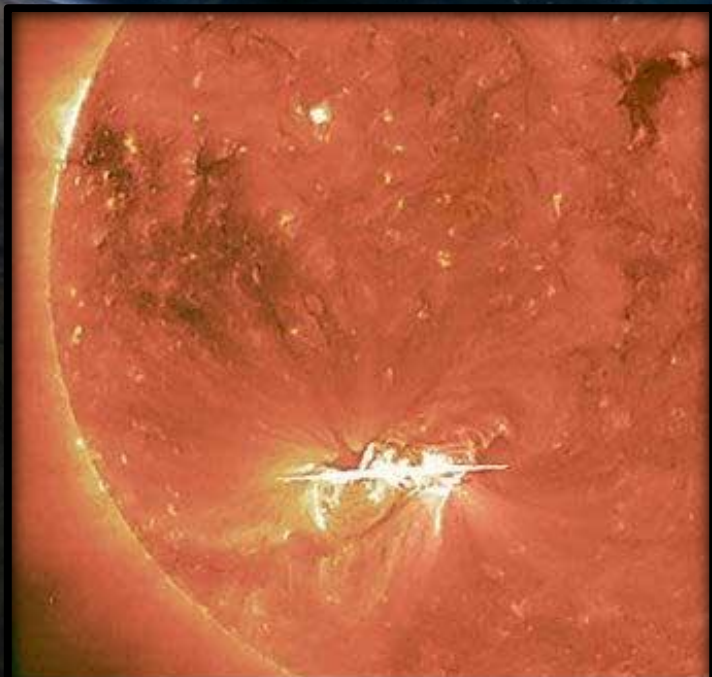


23-й с начала наблюдений Солнечный цикл растянулся почти на 12,5 лет. Возможной причиной этого являются аномалии в «конвейерном поясе» Солнца, мощных течениях плазмы под его поверхностью.



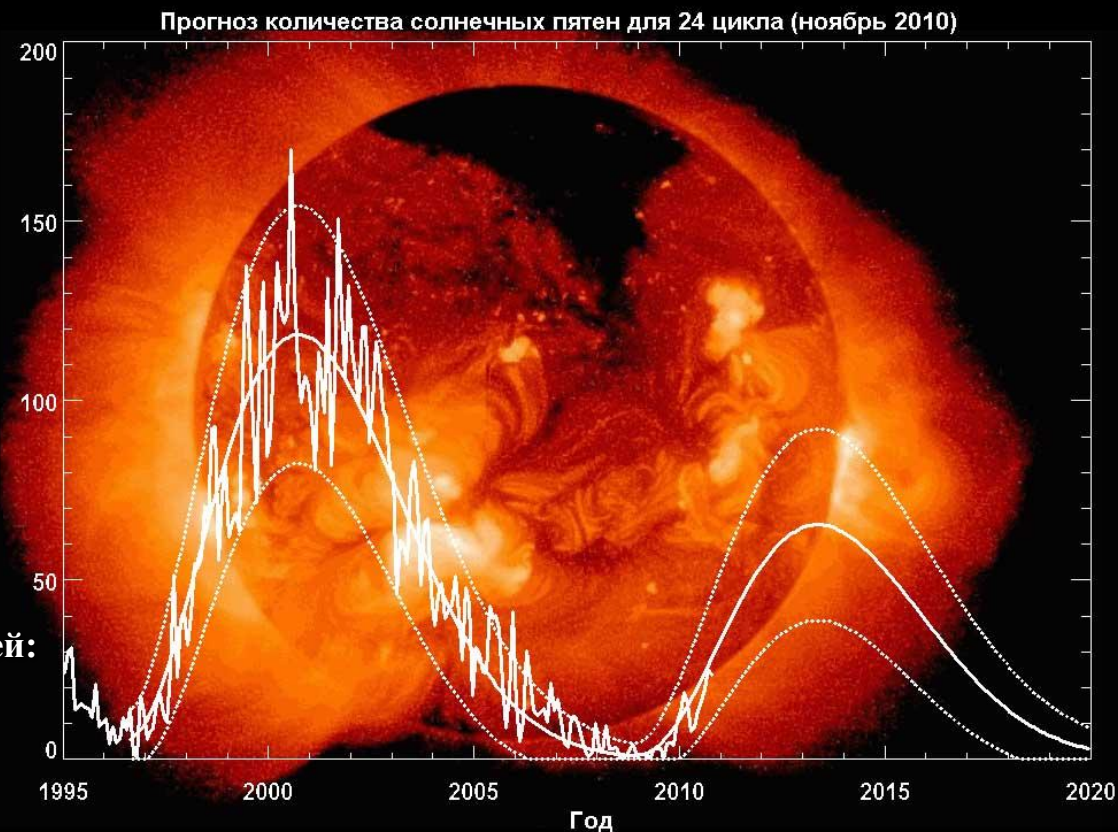
В.А.Головко " Радиационный баланс и чувствительность климата Земли"

Солнечная активность

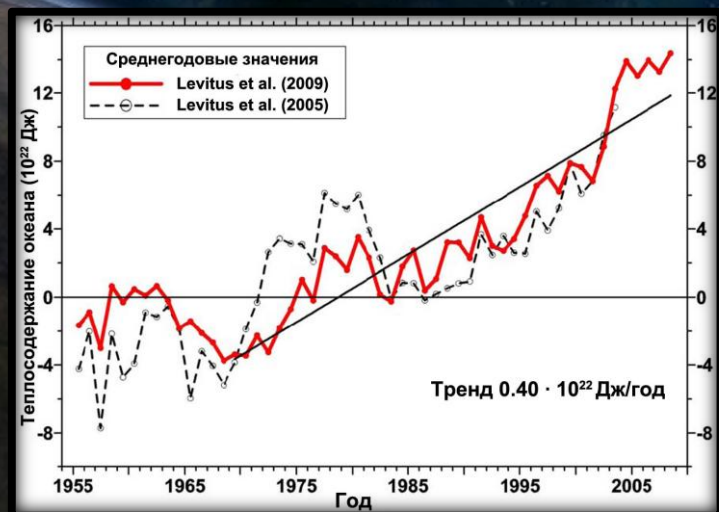


6 ноября 2010 года. Гигантская «трещина на Солнце»

В классификации солнечных вспышек пять основных градаций и каждая в десять раз больше предыдущей: А, В, С, М и Х. Вспышка 6 ноября 2010 г. достигла класса М!



Чувствительность климата Земли



Закон сохранения энергии является мощным средством анализа всех физических систем и климатическая система Земли в этом смысле не является исключением.

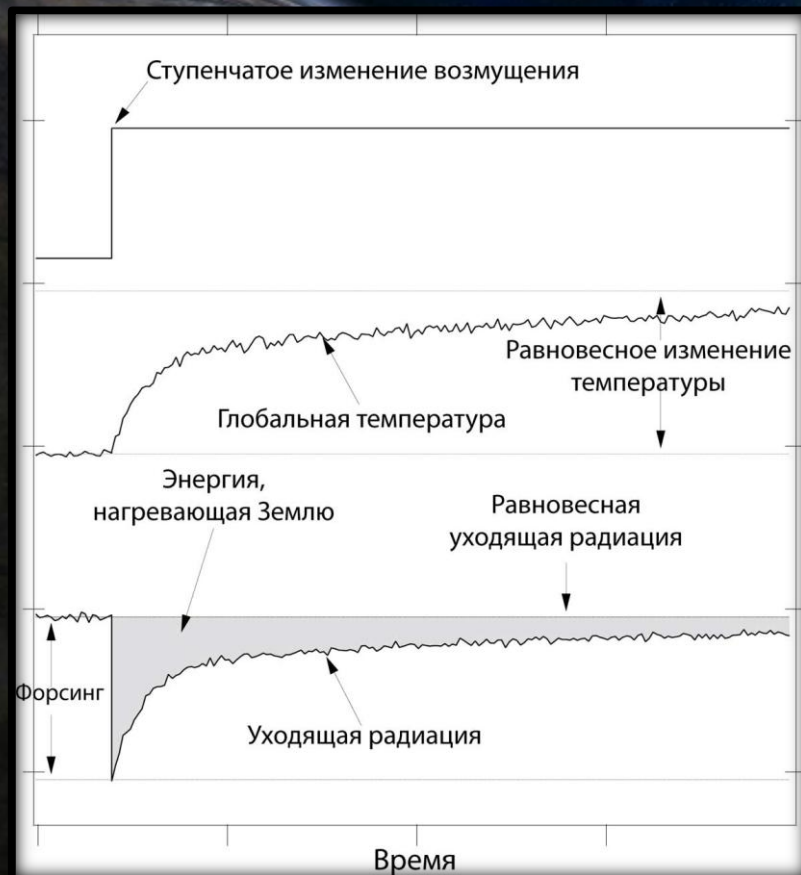
При сопоставлении оценок ожидаемого глобального потепления (около 2.1 K) на основе данных о радиационном форсинге и чувствительности климата с реально наблюдаемым потеплением (около 0.8 K) возникает важный вопрос, чем же объясняется столь значительная разница.

Важной особенностью энергетического баланса Земли является то, что величина УДР определяется локализацией источников (поверхности и атмосферы) со значительно меньшими теплоемкостями, чем глубоководная часть океана. Это приводит к наличию разных временных масштабов в отклике на климатический форсинг.

Двумя важнейшими временными масштабами в отклике на климатическое возмущение являются частичный температурный отклик поверхности в течение около 10 лет и океана в течение столетий.

В течение последних 30 лет Мировой океан аккумулирует в среднем около $0.4 \cdot 10^{22}$ Дж в год. Это на порядок больше, чем вся энергия, получаемая человечеством от сжигания всех видов топлива в течение года.

Чувствительность климата Земли

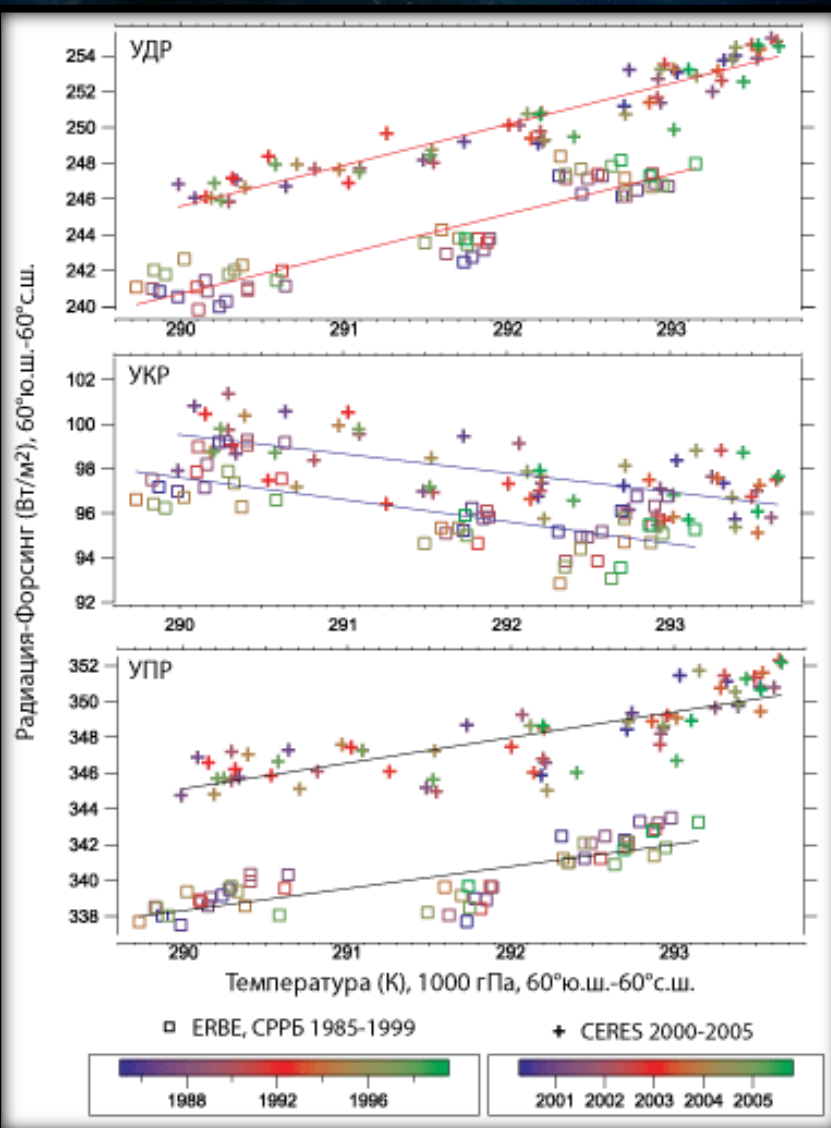


На рис. схематически показана реакция климатической системы Земли на ступенчатое возмущение окружающей среды, например, возрастание концентрации парниковых газов.

Первоначально величина уходящей радиации уменьшается, но за тем возвращается к своему равновесному состоянию по мере нагревания Земли. Для экспресс-анализа чувствительности климатической системы Земли удобно использовать линеаризованную версию энергетического баланса $N = F - \lambda \Delta T + \varepsilon$, где N – РБЗ, F – результирующий форсинг, $\lambda \Delta T$ – изменение радиационного баланса, вследствие изменения температуры ΔT . Для достаточно большого промежутка времени $1/\lambda$ представляет чувствительность климата: когда $\Delta T = F/\lambda$, N стремится к нулю и Земля больше не нагревается.



Чувствительность климата Земли

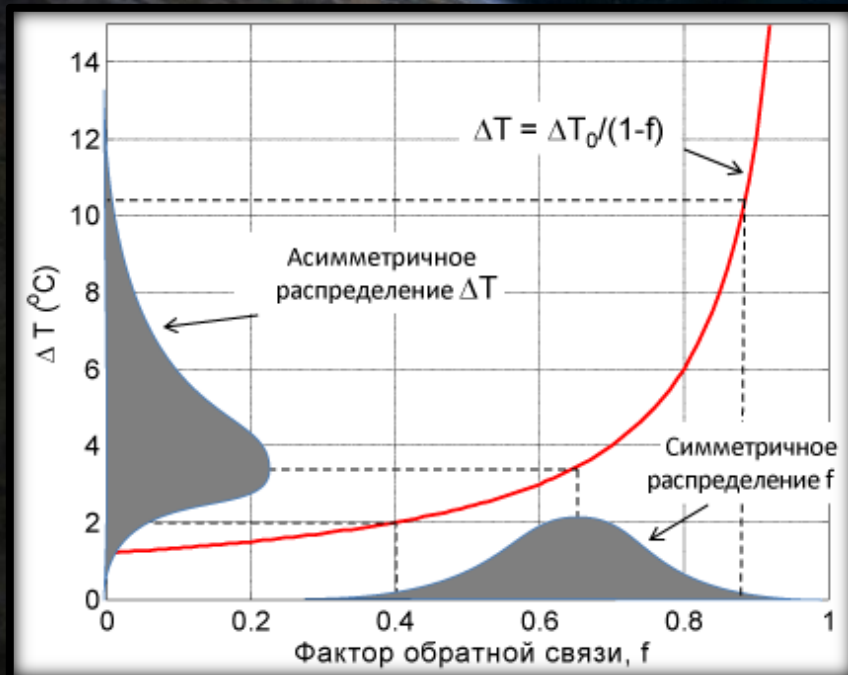


Коэффициент λ имеет размерность $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$.

Его можно оценить путем регрессии на основе данных космических наблюдений (ERBE, CPPB, CERES) и приповерхностной температуры. Современные оценки показывают, что значения λ для УДР, УКР и УПР составляют 2.82 0.42, -1.86 0.69 и 1.25 0.57 $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ соответственно.



Чувствительность климата Земли



Предполагаем, что небольшие изменения радиационного поля на ВГА являются функцией приповерхностной температуры T и обратных связей, которые также зависят от T .

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial R}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial T} \Delta T + o(\Delta T)^2$$

Вводя обозначения,

$$\frac{1}{\lambda_0} = \frac{\partial R}{\partial T}$$

$$f = -\lambda_0 \frac{\partial R}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial T}$$

получаем для «базовой чувствительности» и «фактора обратной связи»

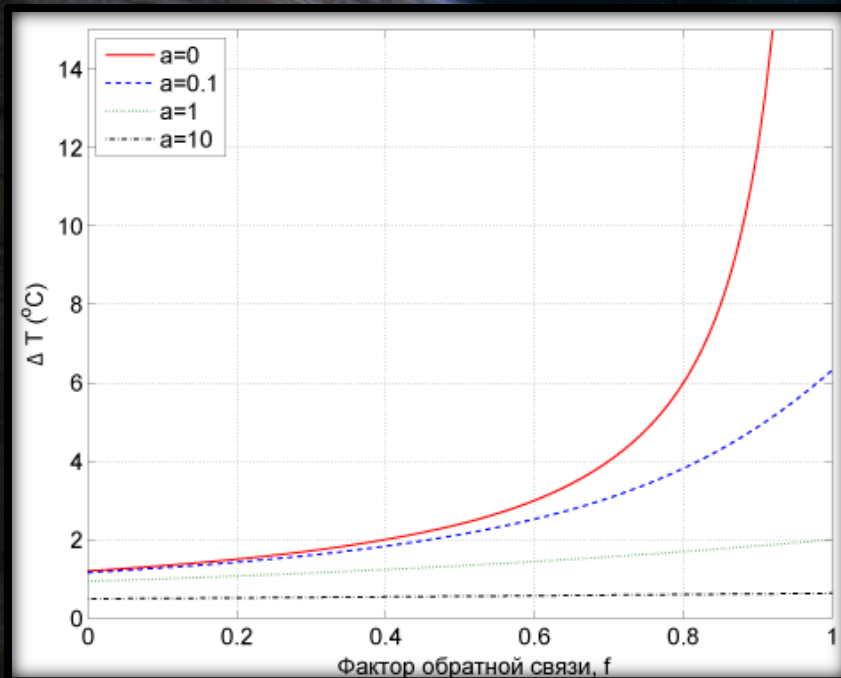
$$\Delta R = \frac{1 - f}{\partial T} \Delta T + o(\Delta T)^2$$

опуская члены высшего порядка малости, получаем для $f_0 \neq 1$

$$\Delta T = \frac{\lambda_0}{1 - f} \Delta R$$



Чувствительность климата Земли



Корректный анализ в случае $f \rightarrow 1$ требует разложения более высокого порядка

$$\Delta R = \frac{1-f}{\lambda_0} \Delta T + a \Delta T^2 + o(\Delta T)^3$$

Это приводит к квадратному уравнению

$$\frac{1-f}{\lambda_0} \Delta T + a \Delta T^2 = \Delta R$$

С решениями (если они существуют)

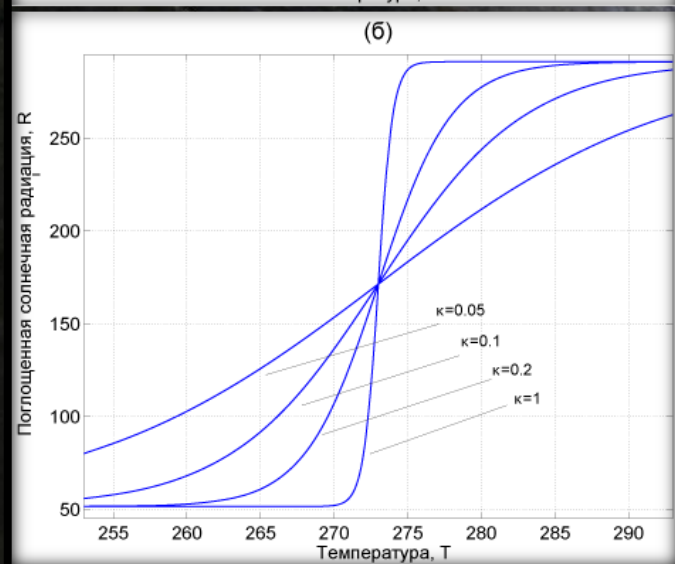
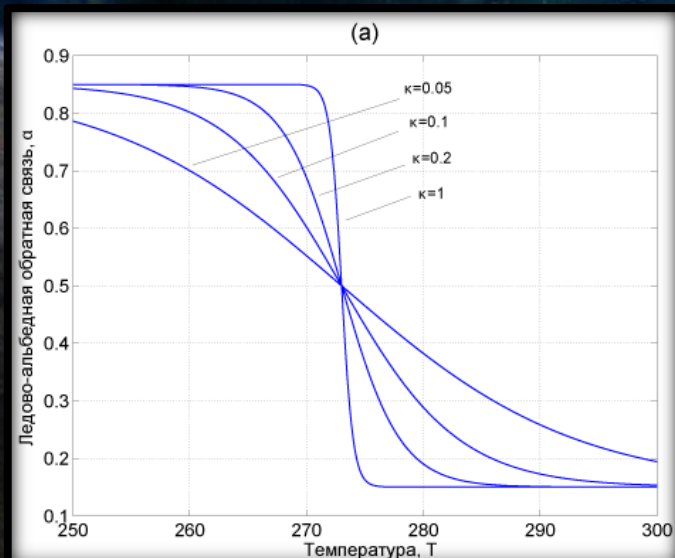
$$\Delta T_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\frac{f-1}{a\lambda_0} \pm \sqrt{\left(\frac{f-1}{a\lambda_0} \right)^2 + \frac{4\Delta R}{a}} \right)$$

В частности для f близкого к 1.0

$$\Delta T_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{\Delta R}{a}}$$



Чувствительность климата Земли



Рассмотрим достаточно простую, но вполне адекватную физическую модель

$$c \frac{dT}{dt} = R_i(T) - R_o(T)$$

Здесь R_i поглощенная, а R_o излученная радиация

$$R_i = \mu Q_0 (1 - \alpha(T))$$

$$\alpha(T; \kappa) = c_1 + c_2 \frac{1 - \tanh \kappa (T - T_c)}{2}$$

$$R_o = \sigma g(T) T^4$$

Парниковый эффект можно параметризовать, используя

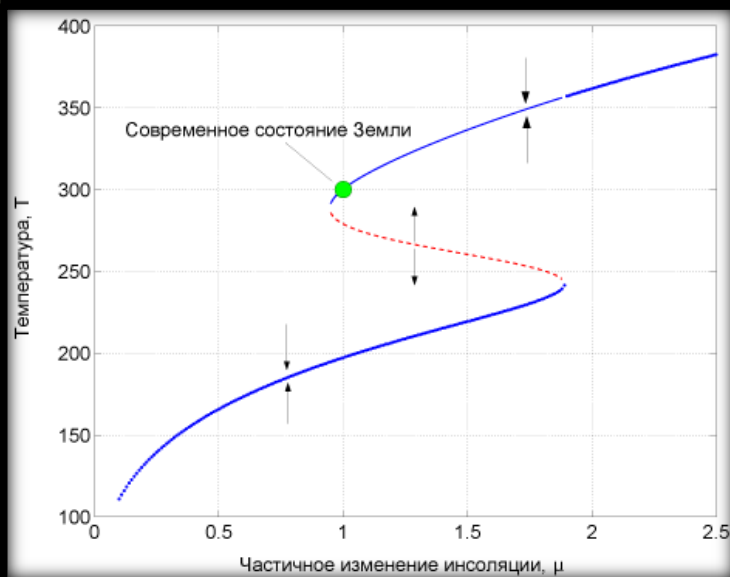
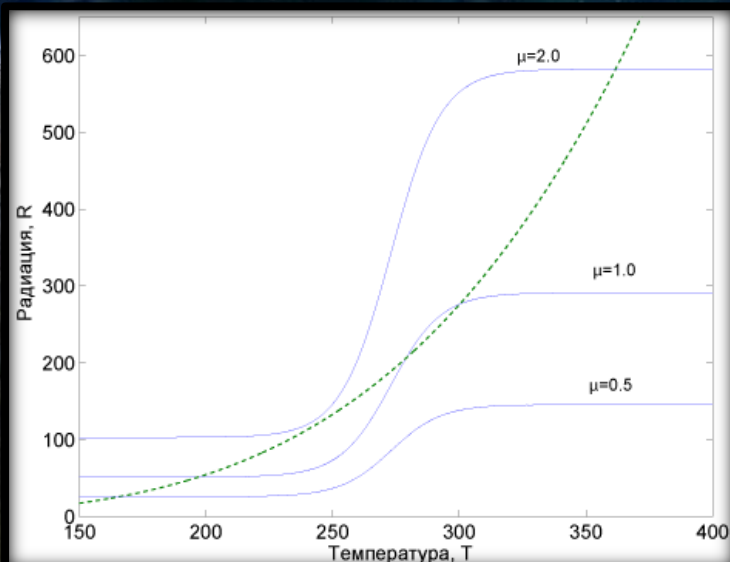
$$g(T) = 1 - m \tanh(T / T_0)^6$$

Таким образом

$$c \dot{T} = \mu Q_0 (1 - \alpha(T)) - \sigma T^4 \left[1 - m \tanh(T / T_0)^6 \right]$$



Чувствительность климата Земли



Параметры модели:

$Q_0=342 \text{ Вт/м}^2$, $T_c=273 \text{ К}$,
 $\{c_1=0.15, c_2=0.7, \rightarrow \alpha(T) \in [0.15, 0.85]\}$,
 $m=0.4$ (40% облачное покрытие),
 $T_0=1.9 \cdot 10^{-15} \text{ К}^{-6}$

Два типа анализа чувствительности:

1. «Быстрая» динамика системы
 $R_i(T) - R_o(T) \neq 0$ для $T \neq T_0$
 «линейный анализ стабильности»
 предусматривает малые отклонения от равновесия
2. «Медленная» динамика системы
 $R_i(T) - R_o(T) = 0$ для всех рассматриваемых T
 «анализ чувствительности»

Здесь мы рассматриваем «медленную» квазиadiaбатическую балансовую модель,
 $R_i = R_o$

$$\mu Q_0 (1 - \alpha(T)) = \sigma T^4 \left[1 - m \tanh \left(T / T_0 \right)^6 \right]$$

Возможны две стабильные ветви решения, разъединенные нестабильным участком.



Технологии геопроектирования



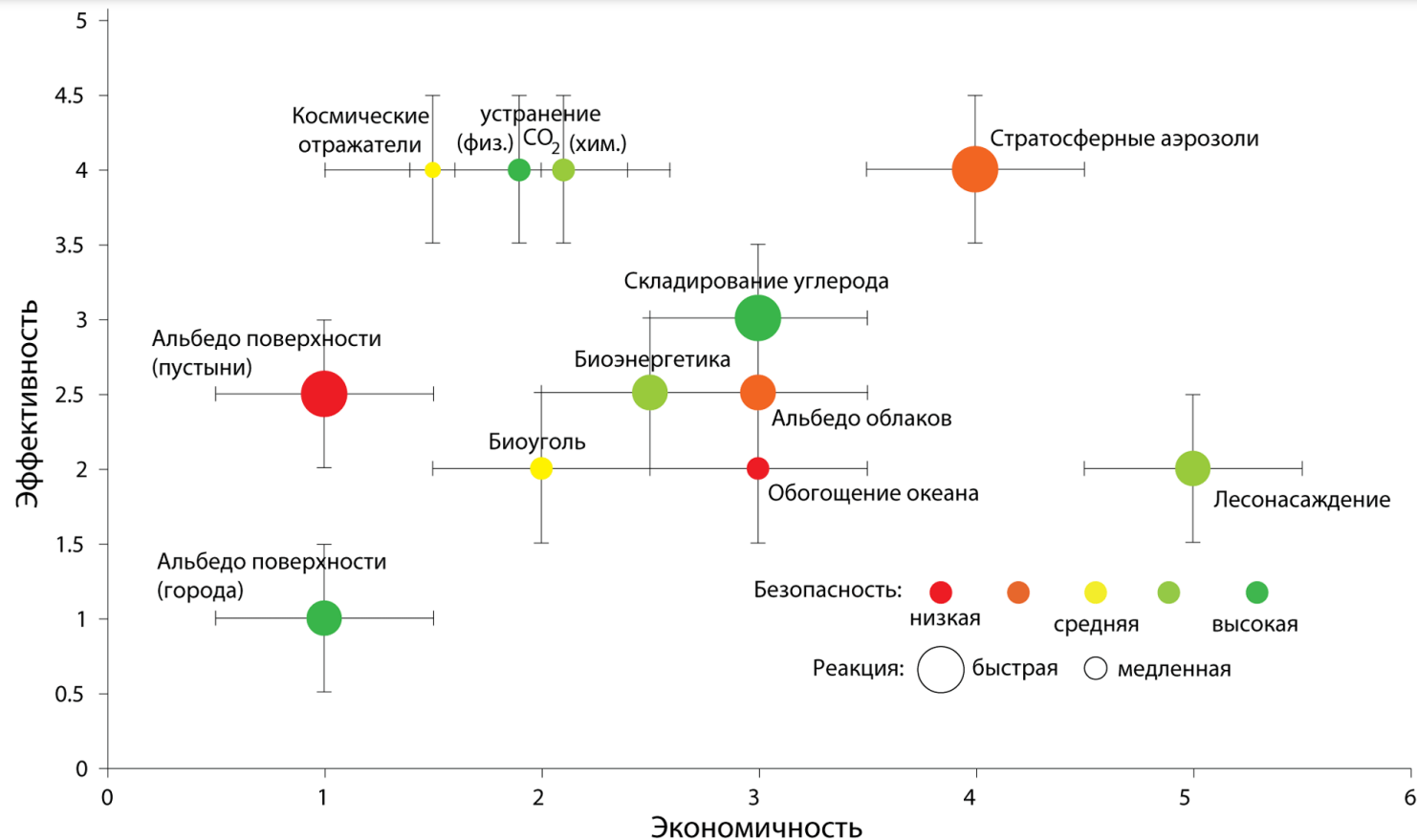
Геоинженерные подходы к стабилизации современного климата подразделяются на две группы:

1. Целенаправленное изменение РБЗ для компенсации парникового эффекта
2. Удаление из атмосферы избыточного количества диоксида углерода

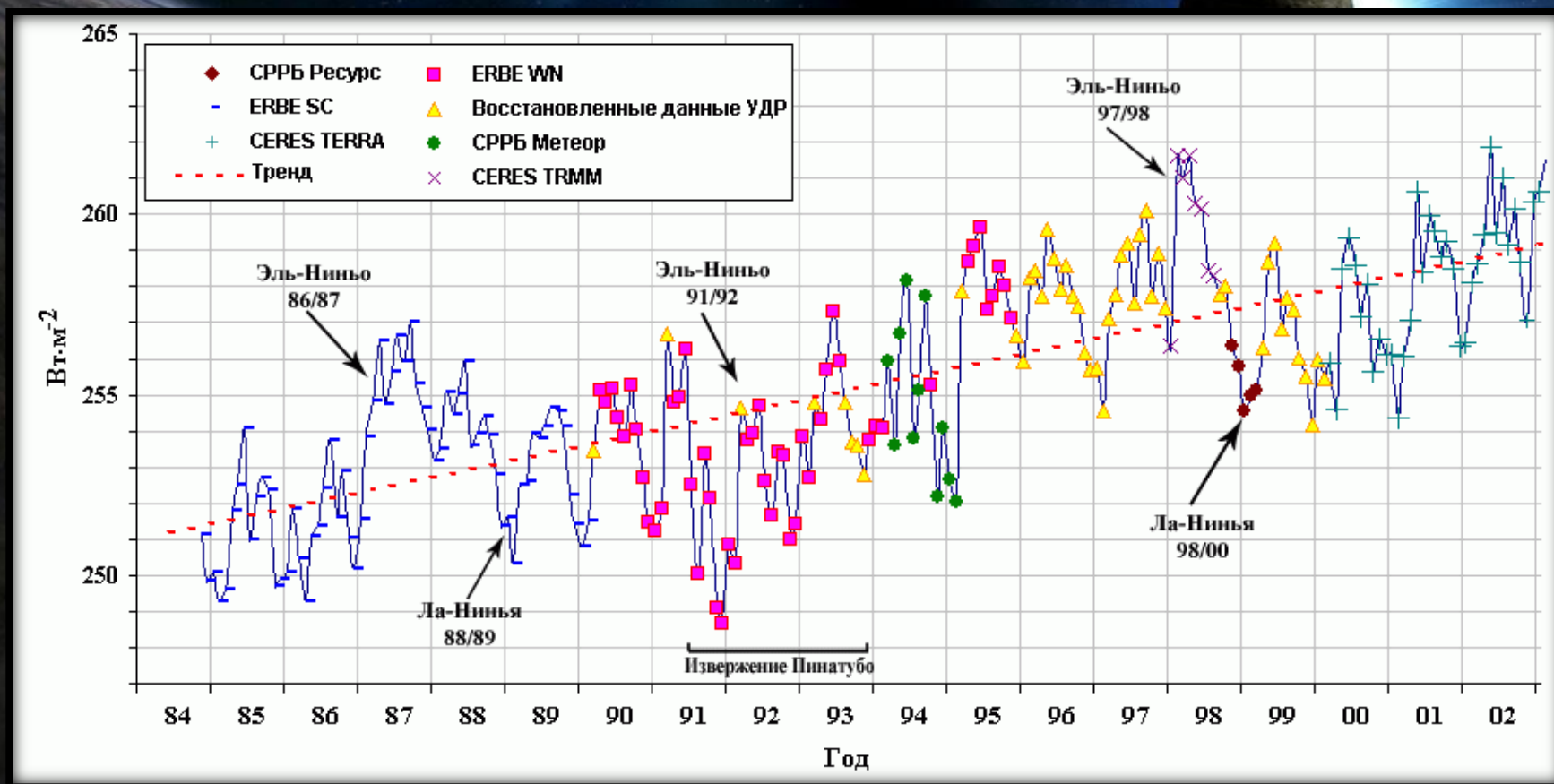
- ❖ К первой группе отнесены такие методы, как введение в стратосферу сульфатных и других отражающих аэрозолей, создание орбитальных отражателей или отражателей в точке Лагранжа, увеличение облачности над Мировым океаном и изменение альбедо самой земной поверхности.
- ❖ В рамках второй группы рассматривается усиление поглощения диоксида углерода лесами, океаном и искусственными поглотителями.



Технологии геопроектирования



Природа проводила натурный эксперимент



Головко В.А., Пахомов Л.А., Успенский А.Б. Глобальный мониторинг составляющих радиационного баланса Земли со спутников "Метеор-3" и "Ресурс-01". Ж. «Метеорология и гидрология», №12, 2003 с. 56-73.



В.А.Головко " Радиационный баланс и чувствительность климата Земли"

Стратосферные аэрозоли – способ инъекции



F-15C-Eagle

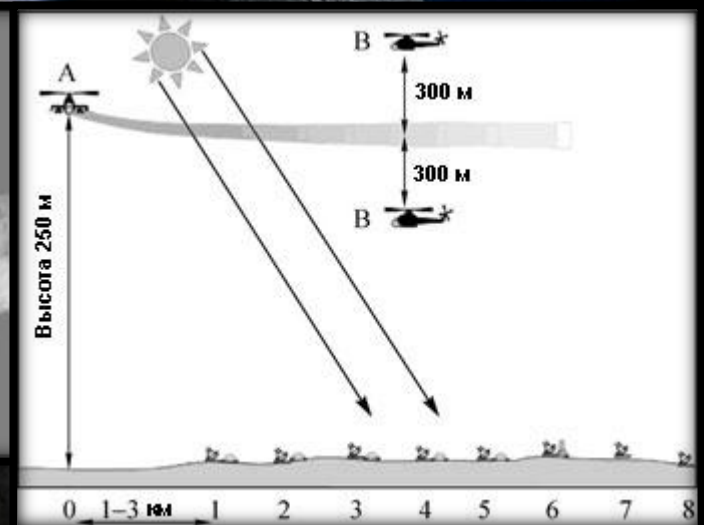
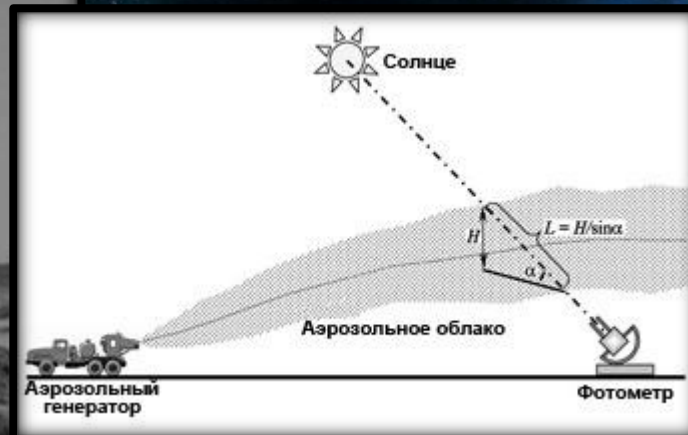


KC-10-Extender



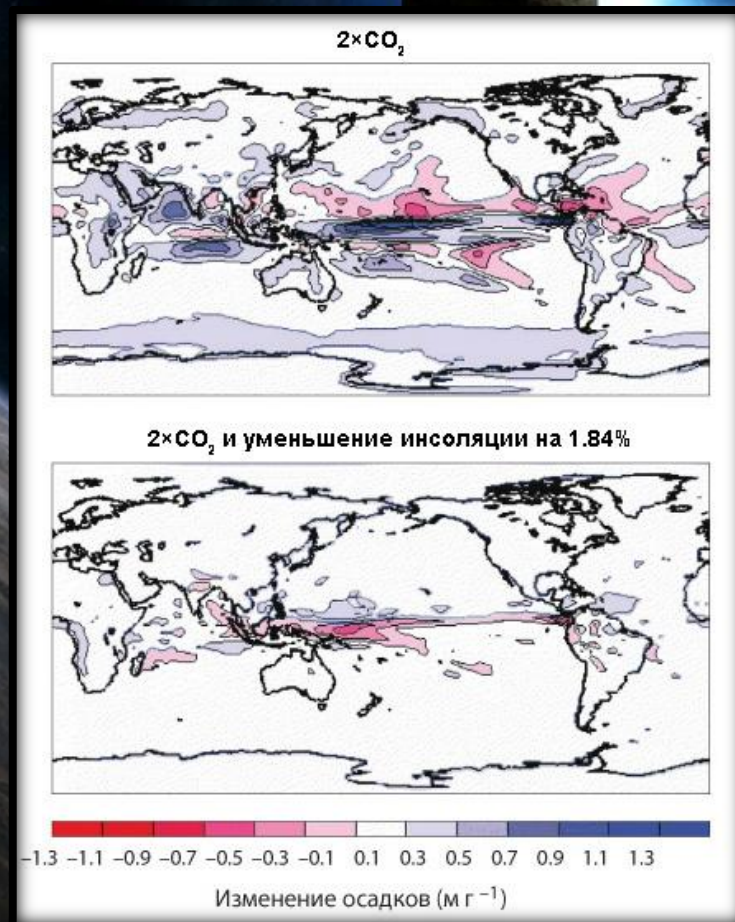
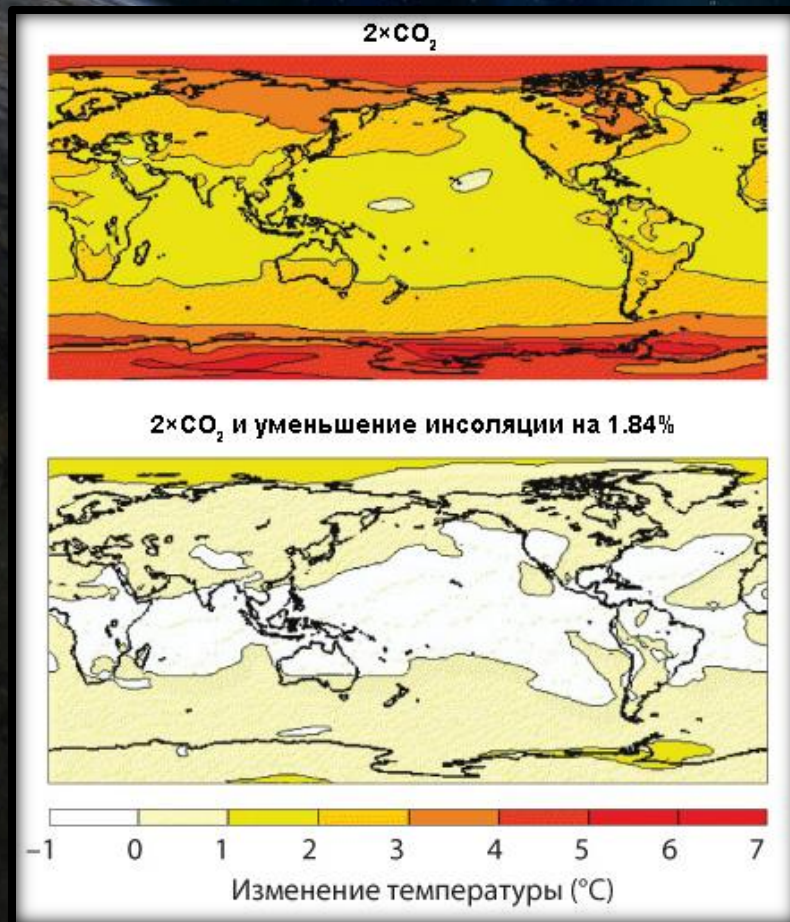
Инжекция сульфатных аэрозолей

Натурные эксперименты НПО «Тайфун»



Стратосферные аэрозоли – сульфатная завеса

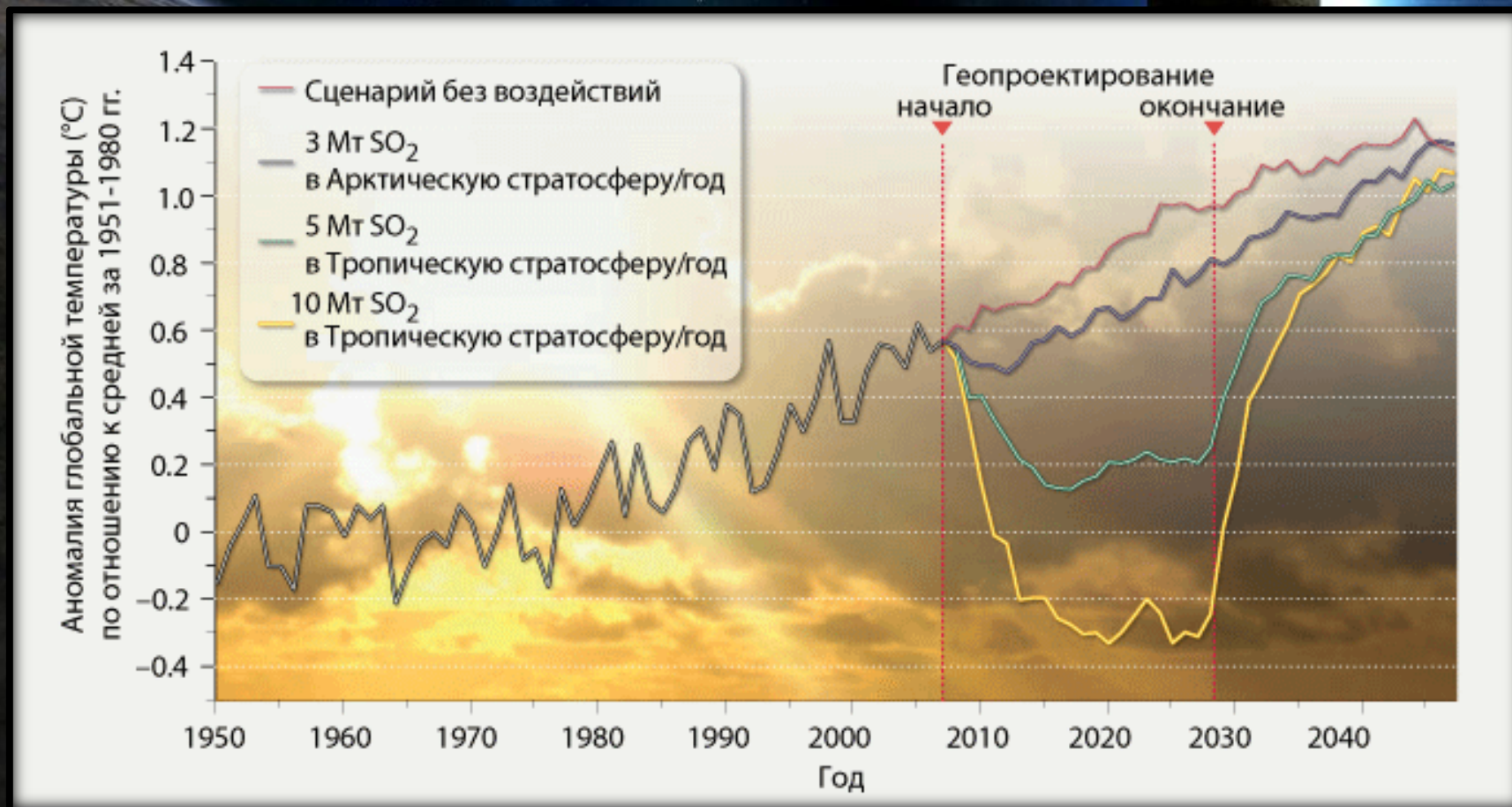
Среднегодовое изменение температуры и осадков по данным GCM при $2 \times \text{CO}_2$ и уменьшении инсоляции на 1.84%



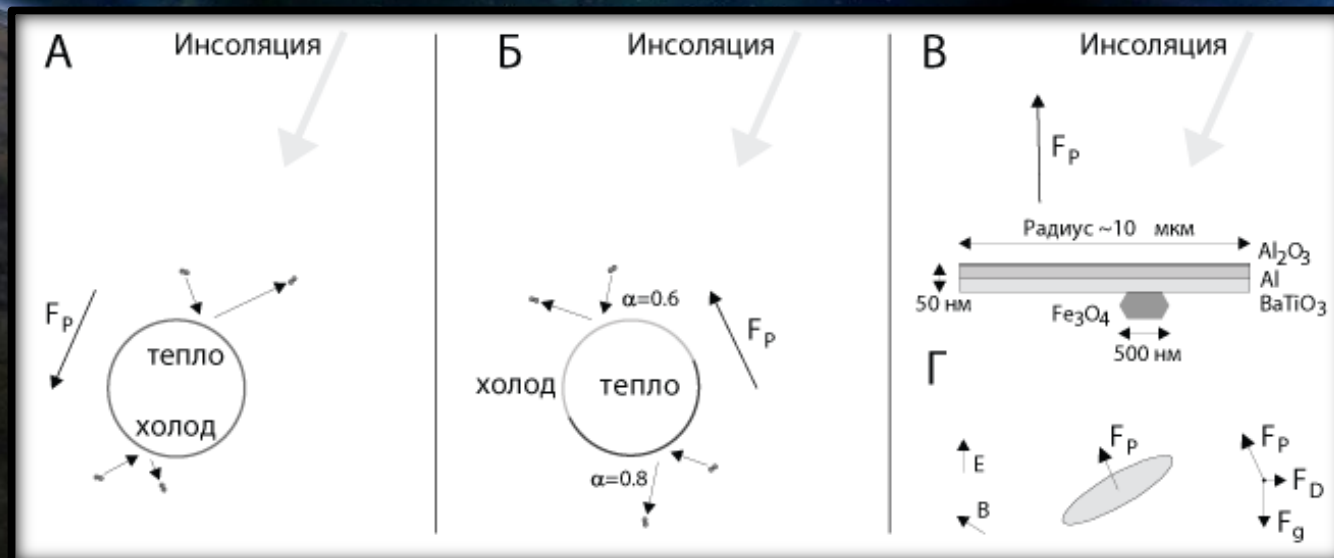
Caldeira & Wood, 2008



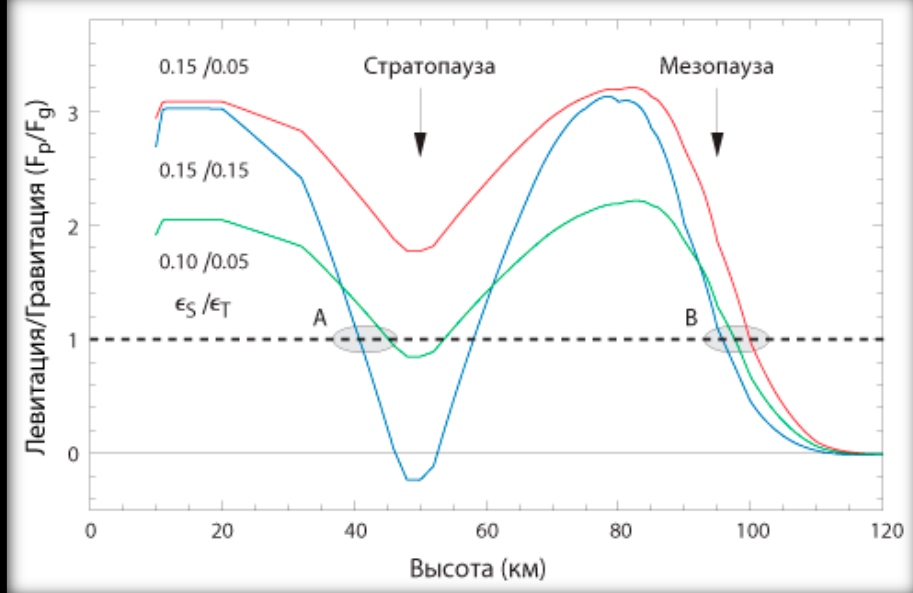
Сценарии сульфатных инъекций



Нанотехнологии в геопроектировании

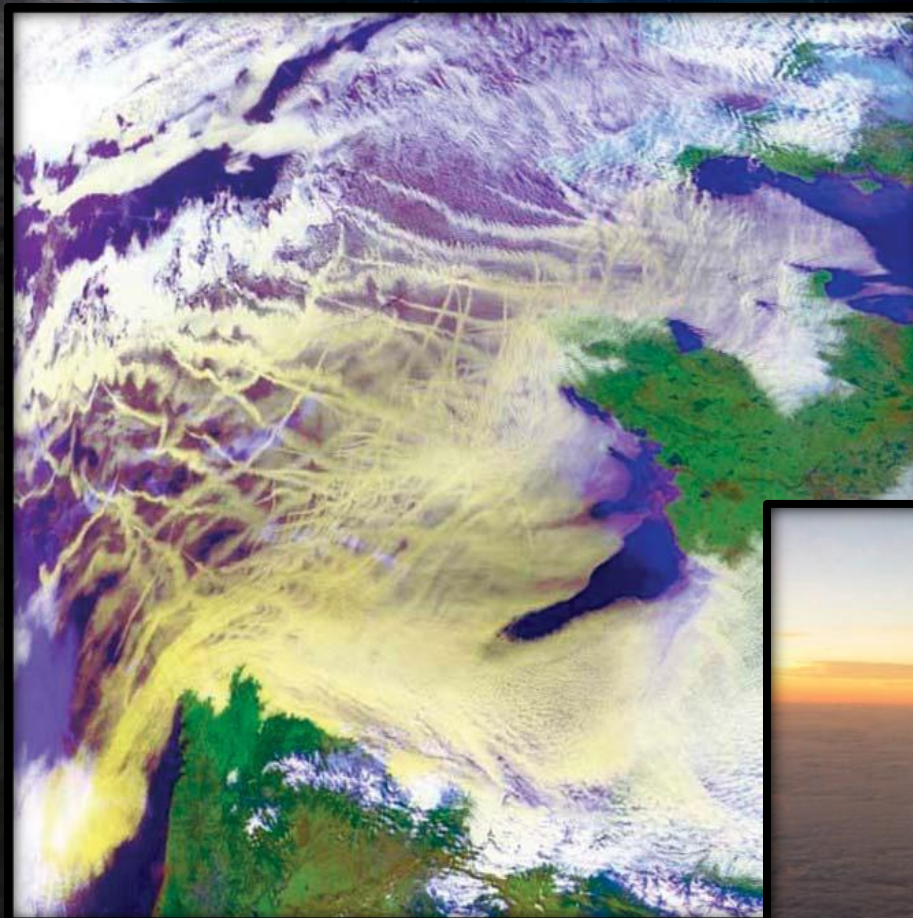


Нанотехнологии позволяют реализовать более оптимальные по сравнению с инъекцией сульфатов методы. Примером является инженеринг наночастиц, подверженных воздействию фотофоретических сил. Этот подход позволяет более эффективно контролировать распределение частиц и их время жизни. Применение электростатических и магнитных материалов позволяет задействовать фотофоретические силы, не реализуемые в природе.



В.А.Головко " Радиационный баланс и чувствительность климата Земли"

Увеличение альбеда низких облаков



← Космическое изображение треков судов в Бискайском заливе, демонстрирующее эффект Твомея

добавление мелких частиц в атмосферу способствует образованию большего числа маленьких капель, вследствие чего облака становятся «белее» и приобретают большую отражательную способность

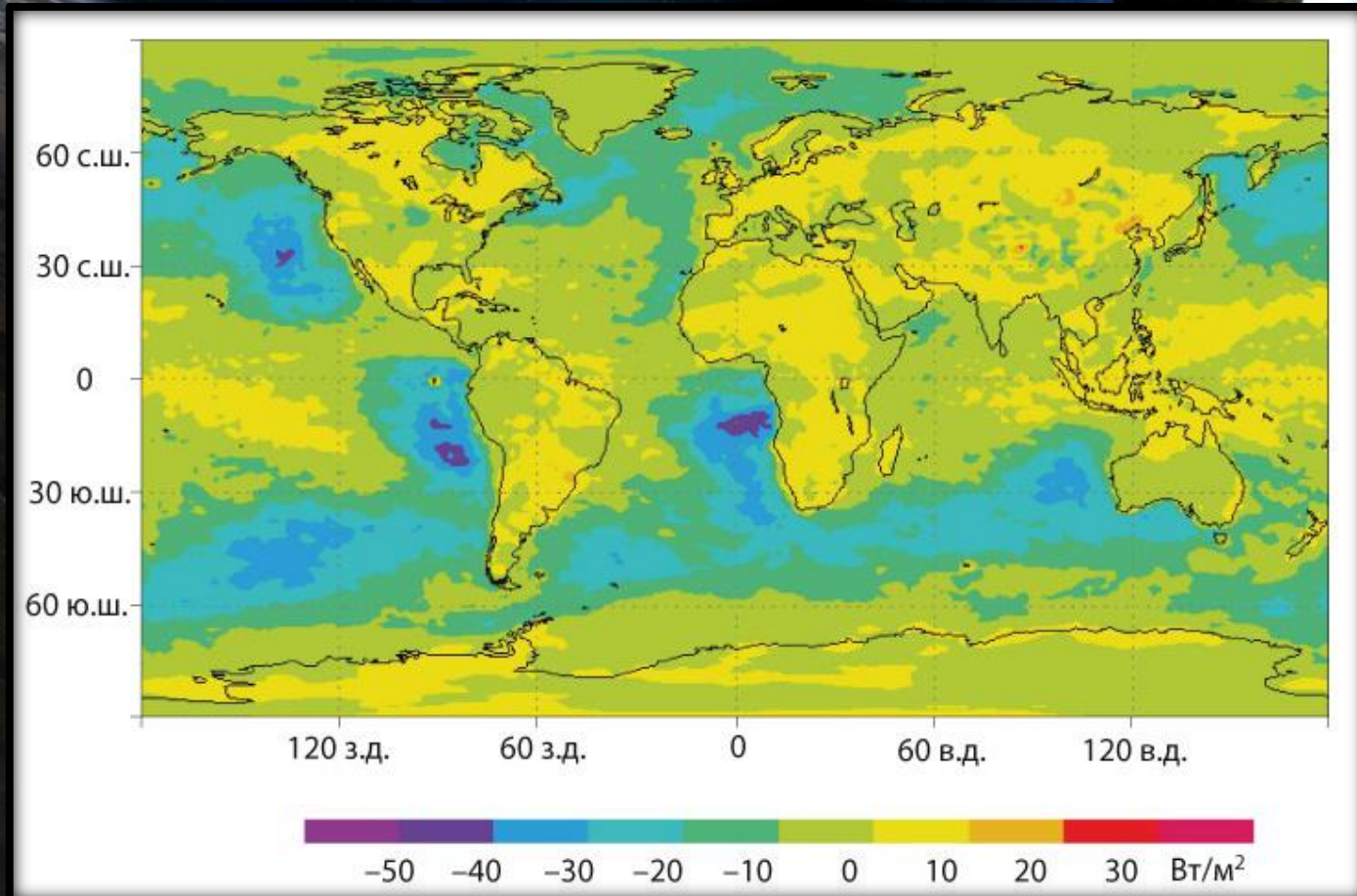


морские облака нижнего яруса →



Увеличение альбеда облаков

Пятилетняя средняя аномалия радиационного форсинга на ВГА при $\text{CCN } 375/\text{см}^3$ (по отношению к $\text{CCN } 100/\text{см}^3$) в регионах с низкими морскими облаками



Latham et al. 2008



Автоматические суда с ротором Флетнера



В конструкции двигателя судна
используется эффект Магнуса

Распылители: кремневые пластины с $1 \cdot 10^9$ протравленных отверстий диаметром менее 1 мкм; производительность: 30 кг/с; покрытие: 1500 судов на территории 4% общей площади океана; стоимость: $\$2 \cdot 10^6$ каждое судно (длина 20 м, роторы высотой 20 м)

Недавно из фонда Билла Гейтса было выделено 300 млн. долл. на пилотный проект по искусственной генерации морских облаков нижнего яруса. На эти деньги в ближайшее время будет построено 10 опытных образцов плавучих средств



Заключение

Фундаментальная задача, которая должна быть решена, состоит в установлении малоизученных в настоящее время особенностей и закономерностей формирования составляющих РБЗ и их пространственно-временной изменчивости на региональных и глобальных масштабах с учетом природных процессов и явлений, а также целенаправленного искусственного изменения оптико-физических свойств атмосферы.

«Климатические аномалии 2010 года могут оказаться "цветочками" по сравнению с "ягодками" - будущими последствиями изменения климата, для сдерживания которого необходимо новое климатическое соглашение, заявила глава секретариата Рамочной конвенции ООН об изменении климата (UNFCCC) Кристиана Фигейрес в преддверии очередного саммита.

Очередной саммит стран-участниц конвенции по проблеме изменения климата пройдет в Канкуне (Мексика) с 29 ноября по 10 декабря 2010 года.



ГЕО-ТЕХНОЛОГИИ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ



До новых встреч,
В.А. Головки

geo.mipt.ru/GVA-group