

Радиационный баланс и чувствительность климата Земли: диагностика и геопроектирование

В.А. Головки

*ГУ Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»,
E-mail: golovko@planet.iitp.ru*

Радиационный баланс Земли (РБЗ) на верхней границе атмосферы (ВГА) является ключевым параметром, характеризующим энергетический обмен между климатической системой Земли и космосом. Возмущения РБЗ (радиационный форсинг) определяют динамику планетарной климатической системы. Оценки чувствительности климата на основе данных РБЗ на ВГА являются важным инструментом прогноза откликов глобальной температуры на радиационный форсинг. Большинство сценариев эволюции климата основываются на данных его чувствительности по отношению к различным факторам. Предложения по геопроектированию ставят своей целью активное воздействие на климатическую систему путем искусственной коррекции составляющих РБЗ для уменьшения роста глобальной температуры.

Ключевые слова: радиационный баланс Земли, глобальное потепление, радиационный форсинг, чувствительность климата, геопроектирование.

Введение

Климат Земли и его чувствительность неразрывно связаны с радиационным балансом нашей планеты. Естественные или антропогенные изменения радиационного баланса Земли (РБЗ), называемые радиационным форсингом, являются основными факторами, определяющими динамику планетарной климатической системы. Совершенствование измерительных средств, в основном связанных с использованием космических технологий, и постоянно возрастающий объем данных наблюдений позволяют сегодня с большей достоверностью представить обобщенную картину важных изменений в климатической системе Земли. Основным инструментом диагностики и прогноза возможных изменений климата является исследование его чувствительности по отношению к различным факторам. Большая неопределенность в современной оценке чувствительности обусловлена наличием сложных обратных связей в климатической системе. Это в первую очередь относится к неоднозначной роли облачности в климатических процессах. Наличие и прогрессирование положительных обратных связей в состоянии значительно ускорить глобальное потепление.

Наблюдающиеся в последние десятилетия аномально высокие темпы потепления климата делают актуальными исследования, связанные с перспективными технологиями формирования отрицательного радиационного форсинга («антифорсинга»). Такие подходы, которые называют геоинженерными, в будущем могут быть задействованы в виде прикладных технологий, реализующих «геопроектирование» (Головки, 2010). В настоящее время в качестве наиболее эффективного и наименее опасного метода противодействия глобальному потеплению рассматривается инъекция в атмосферу аэрозолей (Израэль и др., 2009).

Глобальное потепление продолжается!

Прошли почти четыре года с момента завершения работы над Четвертым докладом Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) в 2007г. Поскольку Пятый доклад ожидается не ранее 2013 г., а ситуация с глобальным потеплением становится угрожающей, был выпущен промежуточный доклад, приуроченный к проведению Климатической конференции на высшем уровне в Копенгагене в декабре 2009. Это событие не обошлось без обострения дискуссии на тему, является ли действительно глобальное потепление угрожающей реальностью для человечества. В качестве аргумента критики феномена глобального потепления приводили некоторые данные открывшейся переписки британских ученых. Однако все недоразумения вскоре были устранены. Важный вклад в окончательное разрешение конфликта внесла публикация авторитетного специалиста Хансена (Hansen et al, 2010) по итогам 2010г. На основе результатов тщательного анализа, датированного 12 января 2011г., самым теплым за 131-летнюю историю инструментальных наблюдений был признан 2010г. Далее в порядке убывания: 2005, 2009, 1998, 2002, 2003, 2006, 2007гг. Это коллегиальное решение всех ведущих научных групп. Важнейшим аргументом продолжения глобального потепления является факт наиболее теплого 2010 г. в период фазы Ла-Нинья и «спокойного» Солнца. Независимый мониторинг приземной температуры в настоящее время осуществляют четыре ведущих научных группы: NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS), NOAA's National Climatic Data Center (NCDC), The Japanese Meteorological Agency и The Met Office Hadley Centre. Основной причиной некоторого несоответствия выводов различных групп ранее являлся не общий тренд, а ранжирование наиболее теплых лет при минимальных различиях. До недавнего времени наиболее теплым годом по данным GISS считался 2005, а по данным Met Office – 1998, что ошибочно трактовалось некоторыми учеными (в частности, британскими), как прекращение глобального потепления в 1998 г. Все ведущие научные группы используют один и тот же источник данных: Global Historical Climatology Network (GHCN). Исключение составляет анализ глобальной температуры по данным бывшего СССР (Lugina, 2006), однако и он демонстрирует хорошее соответствие с данными GHCN. Результаты разных групп в основном различаются нюансами анализа, в частности, минимизации влияния урбанизированных территорий.

Проявления важных последствий потепления климата, признаваемые всеми, это уменьшение морского ледяного покрова в Арктике, таяние ледников в Гренландии, исчезновение ледников в Гималаях, крушение гигантских айсбергов в Антарктике, повышение уровня Мирового океана и т.д. Да, глобальное потепление реальность, которая уже ни у кого не вызывает сомнений. Но если температура возрастет еще минимум на два градуса (как предсказывает теория), то во многих регионах планеты наступит настоящая катастрофа.

Климат Земли обладает существенной тепловой инерцией. В настоящее время этот важнейший факт не всегда адекватно учитывается не только политиками, но и некоторыми учеными. Эффект инерции замедляет реакцию Земли на климатические возмущения, т.е. препятствует изменениям планетарного энергетического баланса выразиться в изменении глобальной температуры.

Космический мониторинг радиационного баланса Земли

Важность слежения за энергетическими потоками на верхней границе атмосферы (ВГА) Земли в настоящее время очевидна. Современные методы космического мониторинга

га позволяют осуществлять контроль всех трех составляющих РБЗ: приходящей солнечной радиации (ПСР), уходящей коротковолновой радиации (УКР) и уходящей длинноволновой радиации (УДР). Результат космического мониторинга РБЗ на ВГА может быть представлен выражением:

$$R=J(1 - A) - L, \quad (1)$$

где J – ПСР, определяемая солнечной постоянной $S_0/4$, A – альbedo Земли; L – УДР. JA определяет УКР. Если определить коальbedo Земли соотношением $\gamma=1-A$, то величина $Q=J\gamma$ определяет поглощенную коротковолновую радиацию (ПКР). В настоящее время текущие глобальные средние значения (см. табл.1), полученные на основе измерений аппаратурой CERES, составляют для УКР – 99.9 Вт/м², соответствующее альbedo A – 0.293, для УДР – 238.3 Вт/м², что заметно отличается от данных (УКР – 107 Вт/м², УДР – 234 Вт/м²), полученных с помощью ERBE и CRRБ (Головко и др., 2003). Современное значение ПКР составляет 241.3 Вт/м²

Таблица 1. Современные глобальные среднегодовые значения РБЗ и его составляющих

Параметр	Ансамблевое среднее (Вт/м ²)	Абсолютное СКО (1 σ) (Вт/м ²)	Относительное СКО (1 σ) (%)	Доверительный интервал (Вт/м ²)
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	3.1	3.1	100.0	-0.4 - 7.0

Длительные космические наблюдения (более 30 лет) дают возможность представить эмпирические доказательства существования современного энергетического дисбаланса Земли (Головко, 2003,2004). Это в первую очередь относится к имеющемуся глобальному положительному тренду УДР и отрицательному – УКР. Важность адекватной диагностики РБЗ средствами космического мониторинга трудно переоценить (Головко, Кондрагин, 2007). Слежение за особенностями энергетического состояния Земли является важным инструментом исследований не только в глобальной климатологии, но и в экодинамике (Golovko, 2008).

К сожалению, приходится констатировать, что проблема необходимой точности радиационных измерений всё 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): $\sqrt{0.2^2 + 0.48^2} = 0.5$, т.е. около 0.5 Вт/м². Что явно недостаточно для адекватной оценки РБЗ.

Лучше всего обстоят дела с измерениями приходящего солнечного излучения. В настоящее время можно сделать вывод, что отсутствует статистически значимый тренд изменения интегральной солнечной постоянной (ИСП). На рубеже 21-го века были тревожные данные о росте ИСП, так тренд между 21-м и 23-м Солнечными циклами составил + 0.037% в десятилетие. Все ждали, что же будет после завершения 23-го цикла. Он растянулся почти на 12,5 лет. Возможной причиной этого являются аномалии в «конвейерном поясе» Солнца, мощных течениях плазмы под его поверхностью. Но «спокойное» Солнце в 2010 г. перешло в 24-й цикл активности и стало ясно, что тренд между 21-м и 24-м циклами составил все-

го + 0.010% в десятилетие, что не является статистически значимым, т.е. означает, что ИСП фактически не изменяется.

Значительно более важным результатом мониторинга солнечного излучения стало обнаружение изменений спектрального состава. Регулярные измерения солнечного спектра в диапазоне 0.2-2.4 мкм с помощью аппаратуры SIM со спутника SORCE (начиная с апреля 2004 г. по настоящее время) позволяют констатировать заметное спектральное перераспределение солнечного излучения: уменьшение в ультрафиолетовой и увеличение в видимой и ближней ИК областях. Термическая структура и композиционный состав атмосферы Земли фундаментальным образом определяются приходящим солнечным излучением и последующей трансформацией потоков радиации и энтропии в ней. Радиация в ультрафиолетовой области спектра инициирует цепочки химических реакций, в частности, определяющих характеристики стратосферного озона, и, таким образом, влияющих на основной источник нагрева средней атмосферы. Радиация в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне в основном достигает и нагревает нижнюю стратосферу и поверхность Земли. Вариации спектрального состава солнечного излучения существенно влияют на динамику атмосферы и в конечном итоге на климат. Важным следствием перераспределения солнечного спектра является изменения спектральных величин потоков радиационной энтропии, зависящих от расстояния до Солнца и определяющих характер сезонных изменений в климатической системе Земли.

Знание спектрального состава падающего солнечного излучения открывает принципиально новые информационные возможности исследования земного климата путем регистрации спектральной зависимости отраженного коротковолнового и уходящего длинноволнового излучений, трансформированных климатической системой Земли. Эту революционную задачу призван решить космический проект CLARREO (Climate Absolute Radiance and Refractivity Observatory). В ходе этого проекта, который запланирован на 2018-2020 гг., кроме регистрации полной квазинепрерывной спектральной зависимости излучения на ВГА, предполагается реализовать и беспрецедентно высокую точность абсолютных измерений, полностью удовлетворяющую требованиям адекватного исследования РБЗ и климата.

Чувствительность климата Земли

Для анализа чувствительности климатической системы Земли предположим, что небольшие изменения радиационного поля на ВГА являются функцией глобальной среднегодовой температуры поверхности (ГСТП) ТП и обратных связей α , которые также зависят от ТП

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

Вводя обозначения $\lambda_0 = \frac{\partial R}{\partial T_{\Pi}}$ и $f = -\lambda_0^{-1} \frac{\partial R}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial T_{\Pi}}$, получаем с использованием

понятий «базовой чувствительности» λ_0 и «фактора обратной связи» f следующее выражение:

$$\Delta R = \lambda_0(1-f)\Delta T_{II} + o((\Delta T_{II})^2)$$

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

$$\Delta T_{II} = \frac{\lambda_0^{-1}}{1-f} \Delta R. \quad (3)$$

Иллюстрация последствий линейного приближения к оценке чувствительности приведена на рис.1 (Roe, Baker, 2007). Эти выводы в своё время вызвали активную дискуссию среди климатологов.

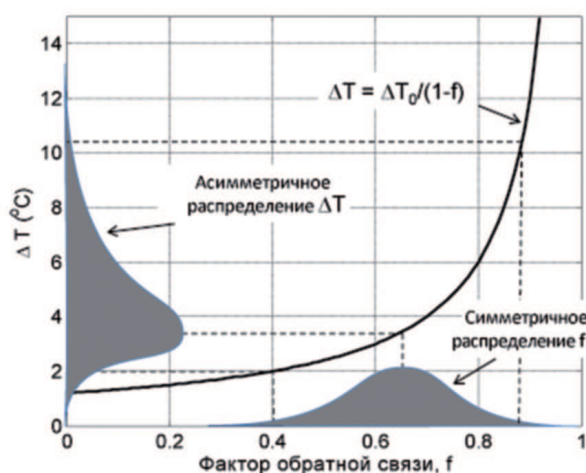


Рис. 1. Отклик температуры как функция фактора обратной связи в линейной климатической модели

Дело в том, что если рассматривать температурный отклик ΔT_{II} как функцию фактора обратной связи f , то при отсутствии обратных связей ($f=0$) отклик на форсинг удвоения CO_2 составит $\Delta T_{II} \approx 1.2$ °C. Отклик усиливается обратными связями, приводя к $\Delta T_{II} \rightarrow \infty$ при $f \rightarrow 1$. Затемненные области на рис.1 иллюстрируют гипотетическое симметричное распределение фактора обратной связи и соответствующее асимметричное распределение отклика ΔT_{II} . Однако, как выяснилось в ходе дополнительного анализа, эта особенность присуща только линейной модели и легко устраняется при обобщении.

Корректный анализ в случае $f \rightarrow 1$ требует разложения более высокого порядка (Zaliapin, Ghil, 2010):

$$\Delta R = \lambda_0(1-f)\Delta T_{II} + a(\Delta T_{II})^2 + o((\Delta T_{II})^3) \quad (4)$$

Это приводит к квадратному уравнению:

$$\lambda_0(1-f)\Delta T_{II} + a(\Delta T_{II})^2 = \Delta R$$

Решения (если они существуют) имеют вид:

$$\Delta T_{\Pi(1,2)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\lambda_0(f-1)}{a} \pm \sqrt{\left[\frac{\lambda_0(f-1)}{a} \right]^2 + \frac{4\Delta R}{a}} \right\} \quad (5)$$

В частности для f близкого к 1.0 имеем

$$\Delta T_{\Pi(1,2)} = \pm \sqrt{\frac{\Delta R}{a}}.$$

Динамика энергетического дисбаланса

Согласно (1), если климатическая система близка к радиационному балансу ($R \approx 0$), то $Q \approx L$, т.е. поглощенное солнечное излучение ПКР компенсируется уходящим в космическое пространство длинноволновым излучением УДР. Энергетический дисбаланс $Q \approx L$, обусловленный вековыми возмущениями Q или L , определяет скорость изменения глобального теплосодержания планеты H , т.е.

$$\frac{dH}{dt} = Q - L. \quad (6)$$

Изменения H могут быть связаны с изменением ТП

$$\frac{dH}{dt} = C \frac{dT_{\Pi}}{dt}, \quad (7)$$

где C релевантная теплоёмкость. Это означает, что C некоторая эффективная теплоёмкость, которая представляет только часть глобальной теплоёмкости, связанной с изменением на временной шкале возмущения. В современном контексте глобальных климатических изменений, вызванных изменением состава атмосферы на временных масштабах от десятилетий до столетий, релевантная теплоёмкость – это теплоемкость, отвечающая за изменение теплосодержания на этих временных масштабах. Измерения теплосодержания нашей планеты, проводимые в течение последних 50 лет, показывают, что доминирующей составляющей в ней является теплосодержание Мирового океана (Levitus, 2009).

Мировой океан имеет поистине феноменальную «теплоемкость». В течение последних 30 лет Мировой океан аккумулирует дополнительно в среднем около $0.4 \cdot 10^{22}$ Дж в год (см. рис.5, Головкин, 2010). Это значительно больше, чем вся энергия, используемая человечеством.

Важной особенностью энергетического баланса Земли является то, что величина сбрасываемой в космос энергии, реализуемой 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 и атмосферы в течение около 10 лет и океана в течение столетий.

Согласно (6-7) и при условии, что УДР может быть представлена в виде $L = \epsilon \sigma T_{\Pi}^4$, где ϵ – эффективная планетарная длинноволновая излучательная способность, определяемая как отношение УДР к величине, вычисленной на основе закона Стефана-Больцмана при температуре ТП (σ – константа Стефана-Больцмана)

$$C \frac{dT_{\Pi}}{dt} = \gamma J - \epsilon \sigma T_{\Pi}^4. \quad (8)$$

Энергетический баланс климатической системы в ответ на возмущение поля радиации (радиационный форсинг) восстанавливается по мере приближения климатической системы к новому состоянию равновесия. Поскольку ТП увеличивается в ответ на приложенное положительное изменение радиационного баланса (положительный форсинг), УДР увеличивается, ограничивая результирующее увеличение роста температуры (см. рис.6, Головки, 2010).

В линейном приближении, согласно (3), при отсутствии обратных связей и для достаточно большого промежутка времени имеем

$$\Delta T_{\Pi}(\infty) = \lambda_0^{-1} F, \quad (9)$$

где F – радиационный форсинг (ΔR), а λ_0^{-1} – «базовая» (равновесная) чувствительность климата. Зависящий от времени отклик T_{Π} в ответ на радиационный форсинг F , как правило, характеризуется в терминах временной константы τ (e-folding), т.е. характерного времени, необходимого для установления нового состояния равновесия после возмущения. Для малого ступенчатого форсинга, проявившегося в момент времени $t=0$, решение уравнения (9) дает

$$\Delta T_{\Pi}(\infty) = \lambda_0^{-1} F (1 - e^{-t/\tau}),$$

где временная константа τ связывается с равновесной чувствительностью λ_0^{-1} посредством теплоёмкости системы в виде

$$\tau = C \lambda_0^{-1}. \quad (10)$$

Знание λ_0^{-1} и τ является важным для понимания сути климатических изменений и возможности их прогноза в ответ на предполагаемый форсинг.

В отсутствие обратных связей, т.е. ϵ и γ в (8) являются константами, решение для малого ступенчатого форсинга имеет вид:

$$\lambda_0^{-1} = T_{\Pi} / 4J\gamma \text{ и } \tau_0 = CT_{\Pi} / 4J\gamma$$

Для современного значения ГСТП $T_{\Pi} \approx 288\text{K}$ оценка λ_0^{-1} составляет $0.30 \text{ K}/(\text{Вт}/\text{м}^2)$.

Исходя из независимой оценки (Levitus, 2009), что поглощение тепла Мировым океаном составляет 84% от полной величины в климатической системе (оставшаяся часть идет на нагрев континентов – 5%, таяние континентальных ледников – 5% и нагрев атмосферы –

4%), можно оценить глобальную теплоёмкость, соответствующую мультидекадным климатическим изменениям (Schwartz, 2007). Современное значение планетарной теплоёмкости C оценивается величиной $16.7 \pm 7.0 \text{ Вт} \cdot \text{год} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ (или $0.5 \pm 0.2 \text{ ГДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$). Временная константа τ краткосрочного установления средней глобальной температуры поверхности в ответ на возмущение составляет 5 ± 1 лет.

Роль обратных связей в климатической системе

Коэффициент λ , характеризующий чувствительность климата, имеет размерность $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$. Его можно оценить путем регрессии на основе данных космических наблюдений (ERBE, CРРБ, CERES) и приповерхностной температуры на уровне 1000 гПа (Murphy, 2009). На рис. 2 показаны примеры такой линейной регрессии для данных ERBE, CРРБ (1985-1999 гг.) и CERES (2000-2005 гг.) в широтной зоне $60^\circ \text{ю.ш.} - 60^\circ \text{с.ш.}$. Современные оценки показывают, что значения λ для УДР, УКР и УПР составляют 2.29 ± 0.09 , -0.86 ± 0.12 и $1.43 \pm 0.13 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ соответственно. Обобщенная оценка λ для УПР в период 1950-2005 гг. может быть принята равной $1.25 \pm 0.5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$

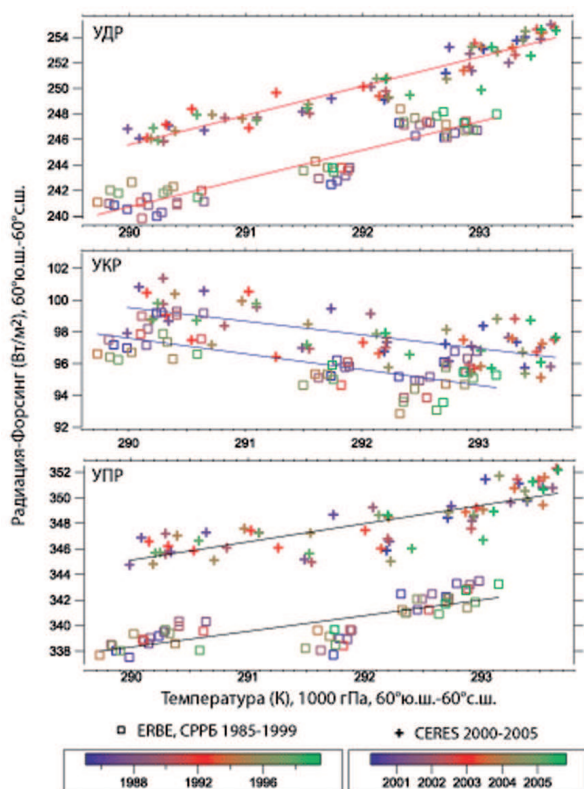


Рис. 2. Регрессия данных уходящего излучения с учетом изменения радиационного форсинга по температуре

В настоящее время наибольшая неопределенность в обратных связях климатической системы относится к облачности. Результирующий эффект облачного покрова Земли на климат крайне изменчив в зависимости от высоты, типа и оптических свойств облаков. Облака играют ключевую роль в регулировании радиационного баланса. Тонкие перистые облака хорошо пропускают солнечное излучение, в то время как блокируют значительную часть теплового излучения от поверхности. Толстые кучевые облака эффективно отражают сол-

нечное излучение и в меньшей степени блокируют тепловое излучение поверхности. Большинство климатических моделей априорно предполагают, что интегральный эффект облачных обратных связей положительный (усиливающий нагрев), хотя в настоящее время под вопросом всё ещё остается не только величина, но и знак этого эффекта.

Оценки чувствительности климата Земли имеют значительную неопределенность в основном вследствие большой неопределенности долговременных обратных связей облачности. Короткопериодную обратную связь облачности можно определить на основе космических наблюдений РБЗ на ВГА (Dessler, 2010). На рис.3 приведены данные об обратных связях облачности, полученные на основе спутниковых измерений аппаратурой CERES, данных реанализа (ECMWF, MERRA) и результатов вычислений с помощью восьми наиболее известных климатических моделей (NCAR PCM1, IPSL-CM4, INM-CM3.0, UKMO-HadCM3, ECHAM/MPI-OM, NCAR CCSM3, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1).

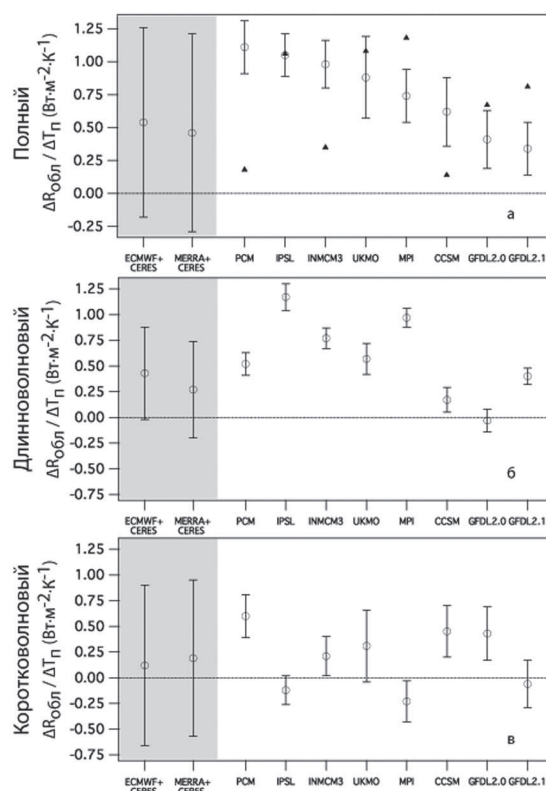


Рис.3. Сравнение откликов компонентов уходящего излучения (а - полный, б - длинноволновый, в - коротковолновый), учитывающих обратные связи облачности, в ответ на краткопериодные изменения климата (окружности с отрезками доверительных интервалов). На рис.3а представлены также данные обратной связи облачности в ответ на долговременные климатические изменения (треугольники)

Результаты наблюдений и моделирования показывают, что 60-80% полной обратной связи облачности в ответ на короткопериодные возмущения климата составляют положительные (за исключением одной модели) длинноволновые обратные связи. Оставшуюся часть составляют более слабые и менее определенные коротковолновые обратные связи. Знак коротковолновой обратной связи более изменчив среди моделей: в пяти положительный и в трех – отрицательный. Заметна тенденция моделей скомпенсировать силу одного вида обратной связи за счет слабости в другом.

Оценка для периода с марта 2000 г. по февраль 2010 г. по данным CERES составляет 0.54 ± 0.74 (2 σ) Вт·м⁻²·К⁻¹

Развитие технологий геопроектирования

В настоящее время все большее число специалистов задумываются над тем, как стабилизировать климат, чтобы противостоять негативным тенденциям глобального потепления. Базовой концепцией решения этой проблемы является управляемое сокращение поглощаемой Землей проходящей солнечной радиации с целью компенсации антропогенного и природного парникового эффекта. 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. В настоящее время наиболее разработанным методом противодействия глобальному потеплению является инъекция в атмосферу аэрозолей. Группа российских ученых, занимающаяся обоснованием метода стабилизации современного климата с использованием сульфатных аэрозолей (Израэль и др., 2009) считает, что создание аэрозольного слоя на тех высотах и в тех количествах, которые лежат в пределах природных вариаций вулканических проявлений, не должно привести к проявлениям катастрофической нестабильности климатической системы Земли. В рамках продолжения теоретических исследований и математического моделирования в настоящее время рассматриваются разные сценарии сульфатных инъекций в атмосферу, учитывающие условия образования частиц в стратосфере, их оптические свойства, влияние на параметры климатической системы, характер переноса и выведения из стратосферы (Keith, 2010a). На рис.4 показана зависимость результата активных воздействий разных интенсивностей (3, 5, 10 Mt SO₂ в год) на арктическую и тропическую стратосферу.

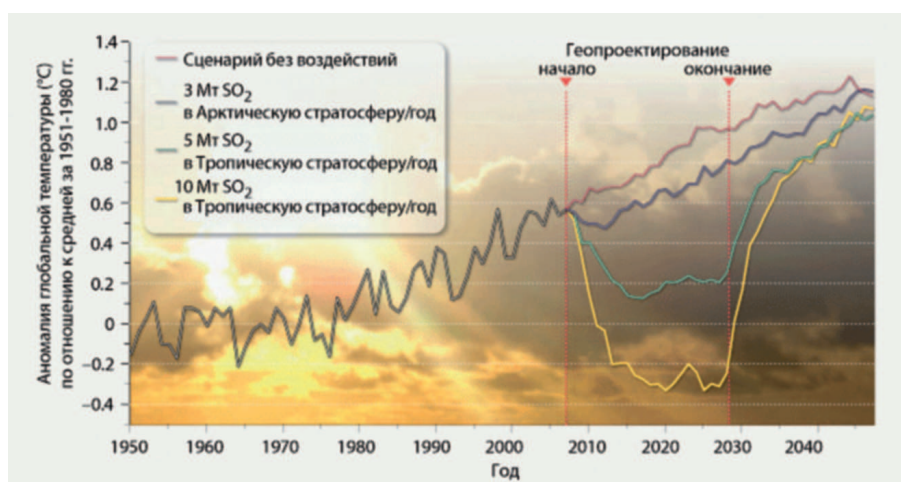


Рис.4. Зависимость результата активных воздействий на арктическую и тропическую стратосферу в виде сульфатных инъекций разной интенсивности

Предварительные оценки потенциальной аномалии глобальной температуры показывают, что при ежегодной инъекции SO₂ массой около 5 Мт в течение 20 лет в арктическую нижнюю стратосферу можно нейтрализовать региональное потепление на ближайшие 30

лет. Однако сульфаты в чистом виде не являются оптимальным компонентом для создания аэрозольных слоев. Современные нанотехнологии позволяют реализовать более оптимальные по сравнению с инъекцией сульфатов методы. Примером является инженеринг наночастиц, подверженных воздействию фотофоретических сил (Keith, 2010b). Рис. 5(а-г) иллюстрирует принцип действия сил фотофореза и композиционный дизайн искусственных нанодисков.

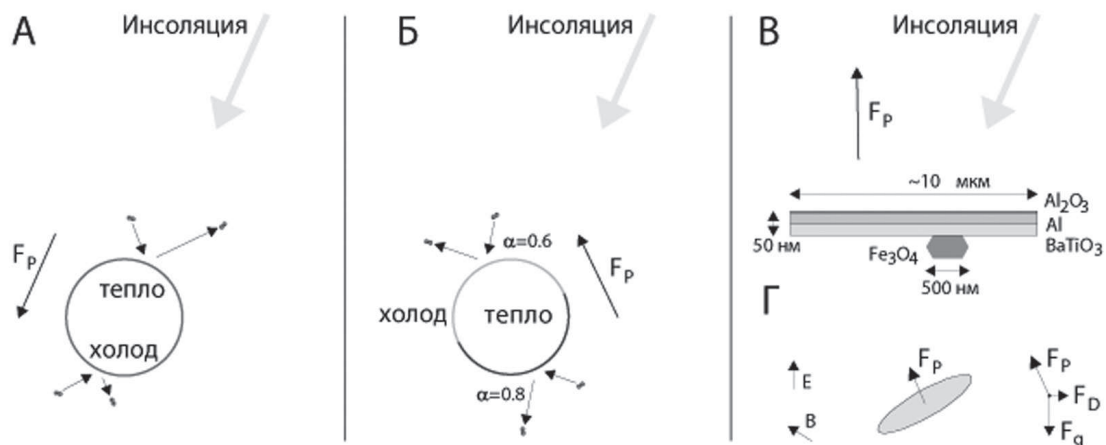


Рис. 5. Принцип действия фотофоретических сил и композиционный дизайн искусственных нанодисков

Этот подход позволяет более эффективно контролировать распределение частиц и их время жизни. Результаты математического моделирования показывают, что искусственные диски диаметром около 10 мкм и толщиной 50 нм, содержащие фракции Al_2O_3 , Al, $BaTiO_3$, Fe_3O_4 , могут подниматься до уровней стратопазы или мезопазы и надолго там задерживаться. На рис.6 показаны уровни возможной стабилизации положения дисков в атмосфере.

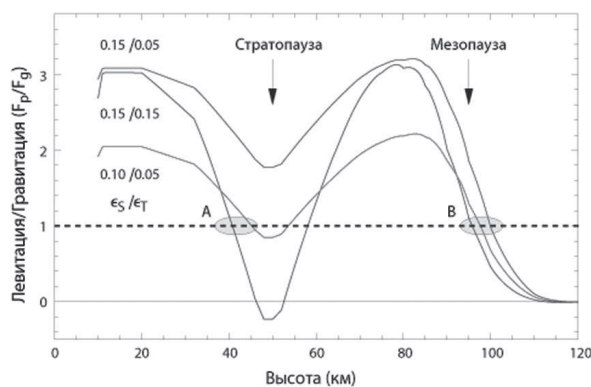


Рис. 6. Уровни (А, В) возможной стабилизации положения искусственных нанодисков в атмосфере

Применение электростатических и магнитных материалов искусственно задействует дополнительные фотофоретические силы, обычно не реализуемые в природе. Следует отметить, что специально подобранные магнитные свойства дисков, позволяют им мигрировать в высокие широты, где эффекты глобального потепления особенно ощутимы.

Заключение

В условиях интенсификации глобального потепления фундаментальная задача, которая должна быть решена в ближайшее время, состоит в установлении малоизученных особенностей и закономерностей формирования составляющих РБЗ и их пространственно-временной изменчивости на региональных и глобальных масштабах с учетом природных и антропогенных процессов и явлений. Это позволит более объективно оценить реальную чувствительность климата Земли и тем самым улучшить прогноз возможных климатических изменений. При этом новейшие космические системы должны сыграть ключевую роль в определении долговременных обратных связей в климатической системе Земли. Всё это в совокупности даст возможность определить критичность состояния климата для человека и необходимость принятия решения об активных воздействиях методами геопроектирования.

Сложность рассматриваемой проблемы геопроектирования и неоднозначность возможных откликов климатической системы в целом на управляемые воздействия на атмосферу делают всестороннее математическое моделирование единственным адекватным инструментом продвижения в этой актуальной проблеме современности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-01-00379-а.

Литература

1. Головкин В.А., Пахомов Л.А., Успенский А.Б. Глобальный мониторинг составляющих радиационного баланса Земли со спутников «Метеор-3» и «Ресурс-01» // Метеорология и гидрология, 2003. №12. С.56-73.
2. Головкин В.А. Глобальное перераспределение составляющих радиационного баланса Земли // Исследование Земли из космоса, 2003. №6. С.3-13.
3. Головкин В.А. Диагностика и прогноз динамики пространственных изменений поля уходящего длинноволнового излучения Земли // Исследование Земли из космоса», 2004. №5. С.3-14.
4. Головкин В.А., Кондранин Т.В. Изучение радиационного баланса Земли по данным космического мониторинга // М.: МФТИ, 2007. Учебное пособие. 174с.
5. Головкин В.А. Геофизические аспекты искусственной коррекции составляющих радиационного баланса для стабилизации климата Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т.7. №2. С. 310-320.
6. Израэль Ю. А., Рябошапка А. Г., Петров Н. Н. Сравнительный анализ геоинженерных способов стабилизации климата // Метеорология и гидрология, 2009. №6, С.5-24
7. Dessler A. E. A Determination of the Cloud Feedback from Climate Variations over the Past Decade // SCIENCE, 2010. Vol 330, 10 December, P.523-527
8. Golovko V. A. The Earth Radiation Budget – Twenty Years Later (1985-2005) // Global Climatology and Ecodynamics: Anthropogenic Driven Changes to Planet Earth, 2008. Springer/Praxis, Chichester, UK, P.29-41.
9. Hansen, J., et al. Global surface temperature change // Rev. Geophys., 2010, 48, RG4004,doi:10.1029/2010RG000345, P.1-29.
10. Keith D.W. Research on global sun block needed now // Nature, 2010. Vol 463, 28 January, P.426-427.
11. Keith D.W. Photophoretic levitation of engineered aerosols for geoengineering, // PNAS, 2010. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1009519107.
12. Levitus, S., et al, Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems // Geophys. Res. Lett., 2009. 36, L07608, doi:10.1029/2008GL037155.
13. Lugina K M., et al, Monthly surface air temperature time series area averaged over the 30 degree latitudinal belts of the globe, 1881–2005 // Trends: A Compendium of Data on Global Change, 2006. doi:10.3334/CDIAC/cli.003.

14. *Murphy, D. M.*, et al, An observationally based energy balance for the Earth since 1950 // *J. Geophys. Res.*, 2009. 114, D17107, doi:10.1029/2009JD012105.
15. *Roe, G. and Baker, M.* Why is climate sensitivity so unpredictable // *Science*, 2007. 318, P.629–632,
16. *Schwartz S.* Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system // *J. Geophys. Res.*, 2007. 112, D24S05, doi:10.1029/2007/2007JD008746
17. *Zaliapin I., Ghil M.* Another look at climate sensitivity // *Nonlin. Processes Geophys*, 2010. 17, P.113–122

The Earth radiation budget and climate sensitivity: diagnostics and geoengineering

V.A. Golovko

Scientific Research Center of Space Hydrometeorology "Planet"
123242 Moscow, B. Predtechensky per., 7
E-mails: golovko@planet.iitp.ru ;

The Earth radiation budget (ERB) at the top of the atmosphere (TOA) is a key parameter which measures the energy exchange between the Earth's climate system and space. Disturbances of ERB (radiation forcing) determine dynamics of planetary climatic system. Estimations of climate sensitivity based on TOA radiation imbalance are main tool in predicting the global temperature response to radiation forcing. Most projections of future climate scenarios are based on climate sensitivity estimations with respect to various factors. Geoengineering proposals aim to intervene in the climate system by deliberately modifying the Earth's energy balance to reduce increases of global temperature.

Keywords: Earth's radiation budget, global warming, radiation forcing, climate sensitivity, geoengineering.