

Геофизические аспекты искусственной коррекции составляющих радиационного баланса для стабилизации климата Земли

В.А. Головко

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

Радиационный баланс Земли (РБЗ) на верхней границе атмосферы является ключевым параметром, характеризующим энергетический обмен между климатической системой Земли и космосом. Возмущения РБЗ (радиационный форсинг) определяют динамику планетарной климатической системы. Современный космический мониторинг показывает, что Земля поглощает энергию от Солнца больше, чем излучает в космос. Этот дисбаланс подтверждается измерениями роста теплосодержания океана на протяжении последних 30 лет. В результате ожидается дальнейшее глобальное потепление даже без изменения состава атмосферы. Предложения по геопроектированию ставят своей целью активное воздействие на климатическую систему путем искусственной коррекции составляющих РБЗ для уменьшения роста глобальной температуры и, в конечном счете, ее стабилизации на более низком уровне, чем это могло бы быть. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-01-00379-а.

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

Введение

Изменение радиационного баланса Земли (РБЗ), которое иногда 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». Среди фактов, доказывающих необходимость решения этой проблемы, следует, в первую очередь, выделить наблюдающееся существенное превышение содержания CO_2 в атмосфере по сравнению со значениями прогноза, определенного Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) в 2007 г., в «худшем» сценарии. Прошло уже более трех лет с момента завершения работы над Четвертым докладом МГЭИК. 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. Несмотря на то, что около трети антропогенного выброса CO_2 поглощает океан, его атмосферная концентрация с 1880 года по настоящее время (постиндустриальный период) возросла уже на 40%, с 280 до 390 ppm. Если бы Земля не имела атмосферы, то ее равновесная температура составляла бы около 255 K. Методом математического моделирования [6] можно показать, что для современной концентрации парниковых газов в атмосфере равновесная средняя по планете приземная температура должна была бы быть выше 290 K, но сегодня среднепланетарная температура поверхности только около 288 K, а за время, истекшее с начала индустриальной эпохи она выросла всего на 0.8 градуса. На рис. 1 приведены последние (2009 г.) данные Института космических исследований Годдарда (Goddard Institute for Space Studies, GISS).

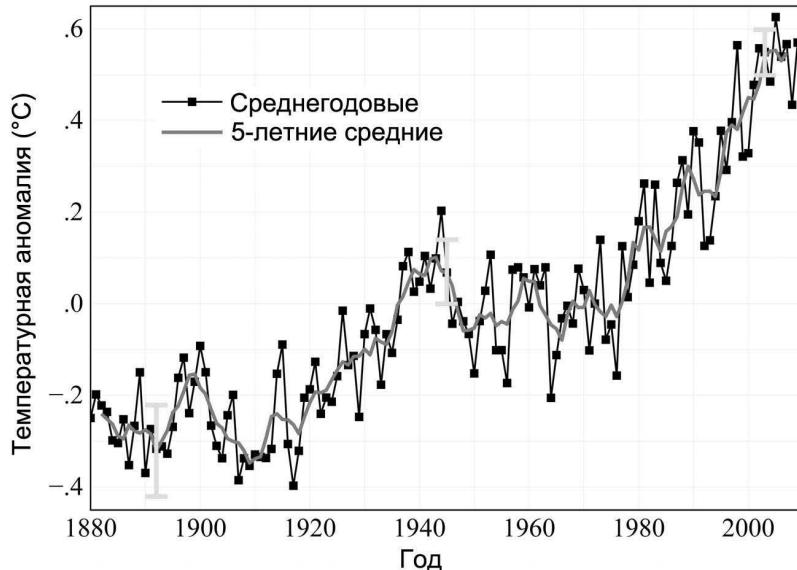


Рис. 1. Средняя по планете температурная аномалия поверхности за период 1880-2009 гг.

Да, глобальное потепление реальность, которая уже ни у кого не вызывает сомнений. Но если бы температура выросла еще минимум на два градуса (как предсказывает теория), то во многих регионах планеты наступила бы катастрофа. Так в чем же дело?

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. Основополагающий симптом тепловой инерции Земли (при наличии возрастающих климатических возмущений) заключается в дисбалансе энергии, поглощаемой и излучаемой планетой.

Космический мониторинг радиационного баланса Земли

Важность слежения за приходящими и уходящими энергетическими потоками Земли в настоящее время очевидна. Современные методы космического мониторинга позволяют осуществлять высокоточный контроль всех трех составляющих РБЗ: падающего солнечного излучения, уходящей коротковолновой радиации (УКР) и уходящей длинноволновой радиации (УДР). На рис.2 схематически представлены составляющие РБЗ с указанием их средних значений. Результат космического мониторинга РБЗ на верхней границе атмосферы (ВГА) может быть представлен выражением:

$$N = Q(1 - A) - L + \varepsilon,$$

где Q – приходящая солнечная радиация, определяемая солнечной постоянной $S_0/4$, A – альбедо Земли; L – УДР. QA определяет УКР; ε – погрешность измерений. В настоящее время текущие глобальные средние значения, полученные на основе измерений аппаратурой CERES, составляют для УКР – $99.5 \text{ Вт}/\text{м}^2$, соответствующее альбедо A – 0.293, для УДР – $239.6 \text{ Вт}/\text{м}^2$, что заметно отличается от данных, полученных ранее с помощью ERBE и СПРБ (УКР – $107 \text{ Вт}/\text{м}^2$, УДР – $234 \text{ Вт}/\text{м}^2$).

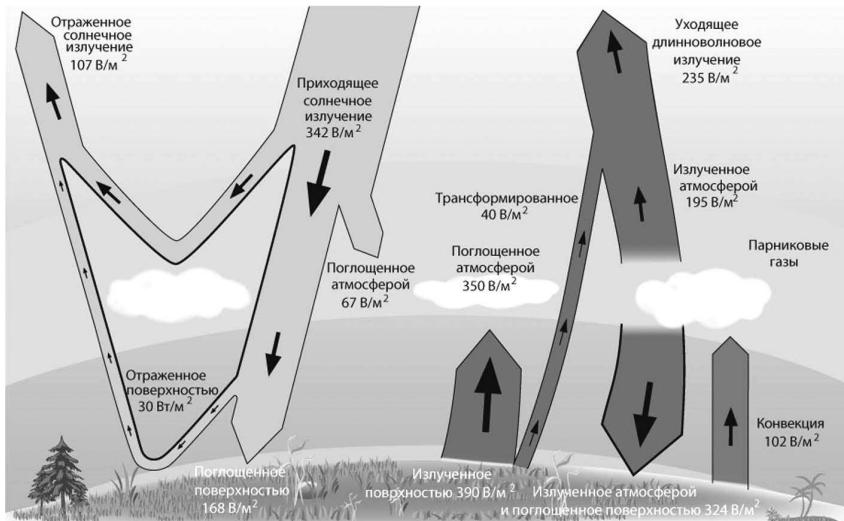


Рис. 2. Радиационный баланс в климатической системе Земли

Длительные космические наблюдения (более 30 лет) дают возможность представить эмпирические доказательства существования современного энергетического дисбаланса Земли [1-7]. Это в первую очередь относится к имеющемуся глобальному положительному тренду УДР и отрицательному – УКР. Уникальный набор данных о составляющих радиационного баланса Земли, полученный с помощью аппаратуры СПРБ с борта российских космических аппаратов «Метеор-3/7», «Ресурс-01/4», и аппаратуры CERES на КА TRMM дал беспрецедентную возможность детального исследования региональных радиационных аномалий в период 1998-1999 г., в частности, исследования фаз El Niño, La Niña Южного Колебания [3]. На рис.3 показан временной ход длинноволновой составляющей радиационного баланса Земли, демонстрирующий положительный рост уходящего ДВ потока в тропическом поясе за период 1984-2003 гг., который может рассматриваться как независимое инструментальное подтверждение потепление климата.

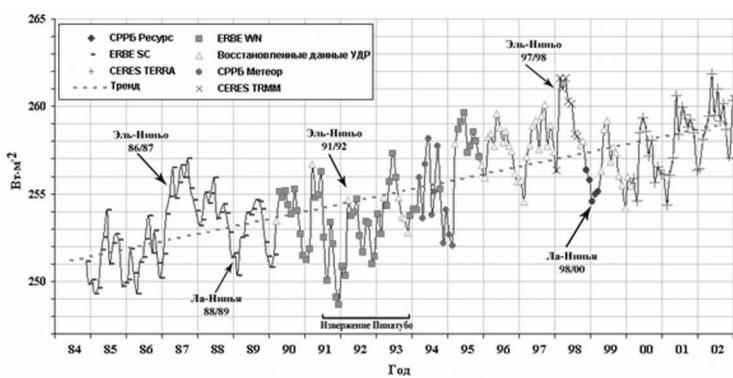


Рис. 3. Реконструированный временной ход УДР и основные аномальные природные явления за период 1984-2003 гг.

На рисунке хорошо прослеживаются основные эпизоды Эль-Ниньо/Ла-Нинья того времени. Следует отметить, что текущие проявления глобального потепления, возможно, были бы еще более значительными в отсутствие периодических эпизодов отрицательного радиационного форсинга, причиной которых являются крупные извержения вулканов. Самыми крупными за последние десятилетия были вулканические извержения в 1982 г. Эль-Чичон и в 1991 г. Пинатубо. Выбросы этих вулканов содержали большое количество сернистых соединений и образовывали вулканические облака аэрозолей, которые сохранялись

в течение ряда лет в стратосфере. Кроме этого, крупные выбросы пепла экранировали солнечное излучение, препятствуя, таким образом, нагреву Земли. После извержение вулкана Пинатубо на Филиппинах в 1991 году данные измерений ERBE позволили зафиксировать глобальные аномалии радиационных потоков, которые отчетливо на рис.3. Частицы атмосферного аэрозоля изменили РБЗ вследствие более значительного отражения от них солнечного излучения в космическое пространство. Глобальное уменьшение УДР в августе-сентябре 1991 г. составляло около $4 \text{ Вт}/\text{м}^2$, которое постепенно стремилось к нулю вплоть до марта 1993 г. За это время климатическая система Земли недополучила энергии порядка $5,6 \times 10^{22}$ Дж. В результате выхолаживание атмосферы и земной поверхности привело к понижению средней глобальной температуры на $0.3\text{--}0.4^\circ\text{C}$. После извержения вулкана Эль-Чичон в Мексике в 1982 году средняя температура на земном шаре также заметно снижалась. Именно сильные извержения вулканов некоторые ученые считают причиной "ядерных зим", происходивших неоднократно в истории Земли. По мнению специалистов, эпохам оледенения часто предшествовало усиление вулканической активности на планете.

На рис.4 показаны реконструированные с использованием всех имеющихся данных космических наблюдений (ERBE, СРРБ и CERES) временные ряды УДР и УКР для тропической зоны (20° ю.ш.- 20° с.ш.) [7].

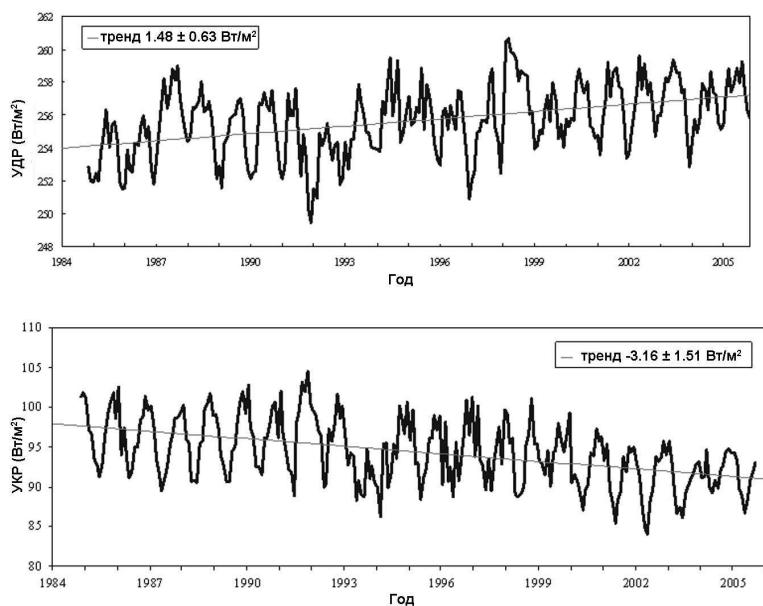


Рис. 4. Реконструированные временные ряды УДР и УКР для тропической зоны (20° ю.ш.- 20° с.ш.)

По последним данным (с учетом аномальных явлений в полярных регионах) абсолютное значение тренда УКР превосходит значение тренда УДР. Это означает, что Земля в настоящее время получает все больше энергии, чем ее излучает в космическое пространство.

Чувствительность климата Земли

Закон сохранения энергии является мощным средством анализа всех физических систем и климатическая система Земли в этом смысле не является исключением. Важной особенностью энергетического баланса Земли является то, что величина УДР определяется локализацией источников (поверхности и атмосферы) со значительно меньшими тепло-

емкостями, 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.

Мировой океан имеет поистине феноменальную «теплоемкость», только его уникальная тепловая инерционность спасает нас от экстремального проявления глобального потепления. На рис. 5 показан рост теплосодержания верхнего (700 м) слоя океана.

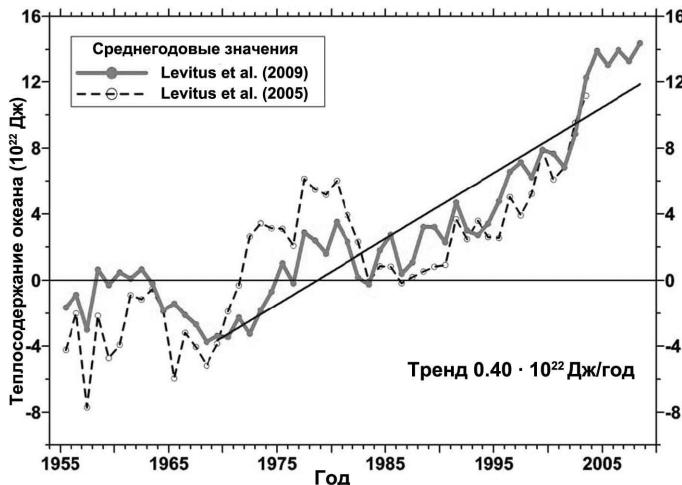


Рис. 5. Изменение теплосодержания верхнего (700 м) слоя океана

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. Наше счастье, что океан со своей огромной теплоемкостью пока просто не успел отреагировать на 40% увеличение атмосферной концентрации CO₂. Полный цикл термогалинной циркуляции в океане составляет 1-2 тысячи лет.

На рис.6 схематически показана реакция климатической системы Земли на ступенчатое возмущение окружающей среды, например, возрастание концентрации парниковых газов [8].

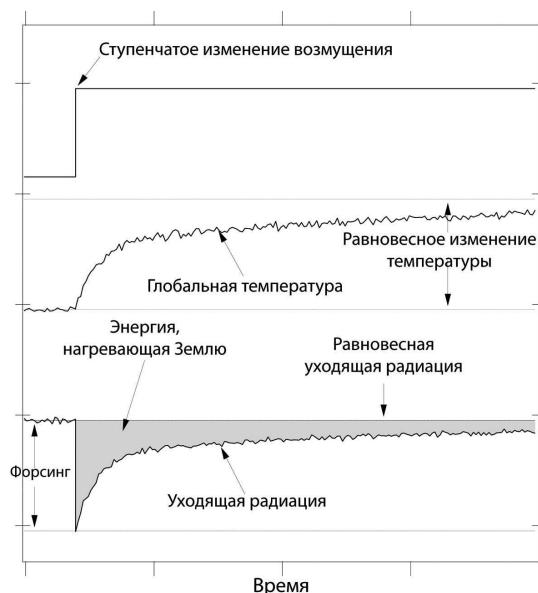


Рис. 6. Реакция климатической системы на ступенчатое возрастание концентрации парниковых газов в атмосфере Земли

Из данных, приведенных на рисунке, видно, что первоначально величина уходящей радиации уменьшается, но за тем возвращается к своему равновесному состоянию по мере нагревания Земли. Начальный быстрый температурный отклик уменьшает количество энергии, идущей на нагрев Земли, и замедляет результирующее приближение к равновесию. Для анализа чувствительности климатической системы Земли удобно использовать линеаризованную версию энергетического баланса

$$N = F - \lambda \Delta T + \varepsilon,$$

N – РБЗ, F – результирующий форсинг, ΔT – изменение радиационного баланса, вследствие изменения температуры ΔT , а ε – инструментальный шум и внутренняя изменчивость. Для достаточно большого промежутка времени $1/\lambda$ представляет чувствительность климата: когда $\Delta T=F/\lambda$, N стремится к нулю и Земля больше не нагревается [8]. В данном случае мы интерпретируем λ , как коэффициент для прогноза межгодовых и декадных изменений РБЗ, в виде функции температуры поверхности. Коэффициент λ имеет размерность $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$. Он оценивается путем регрессии на основе данных космических наблюдений составляющих РБЗ (ERBE, СРРБ и CERES) и температуры поверхности. Современные оценки показывают, что значения λ для УДР, УКР и РБЗ составляют 2.82 ± 0.42 , -1.86 ± 0.69 и $1.25\pm0.57 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$ соответственно.

Методы и технологии геопроектирования

Осознав проблему глобального потепления, специалисты все чаще задумываются над тем, как стабилизировать климат, чтобы противостоять негативным тенденциям [9]. Базовой концепцией решения этой проблемы является управляемое сокращение поглощаемой Землей приходящей солнечной радиации с целью компенсации антропогенного и природного парникового эффекта. На рис. 7 схематически показаны потоки солнечного излучения, которые могут быть скорректированы средствами атмосферного и наземного менеджмента (специальными технологиями геопроектирования).

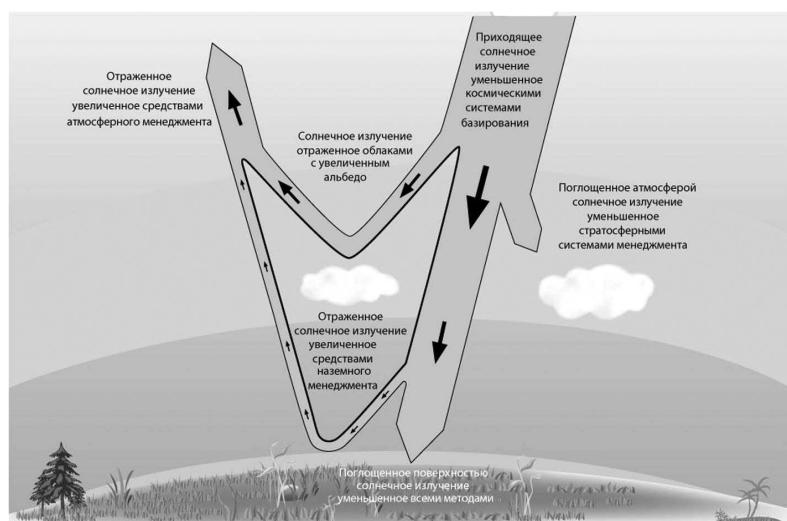


Рис. 7. Возможные воздействия с помощью технологий геопроектирования на потоки солнечного излучения

В настоящее время экспертами рассматривается довольно большое число возможных технологий геопроектирования. В качестве основных критериев пригодности тех или иных методов анализируются четыре: 1) эффективность, 2) экономичность, 3) безопасность и 4) быстрота реакции. На рис. 8 приведена диаграмма, отражающая современные представления о предлагаемых технологиях геопроектирования с точки зрения полуоколичественной оценки этих четырех критерииев.

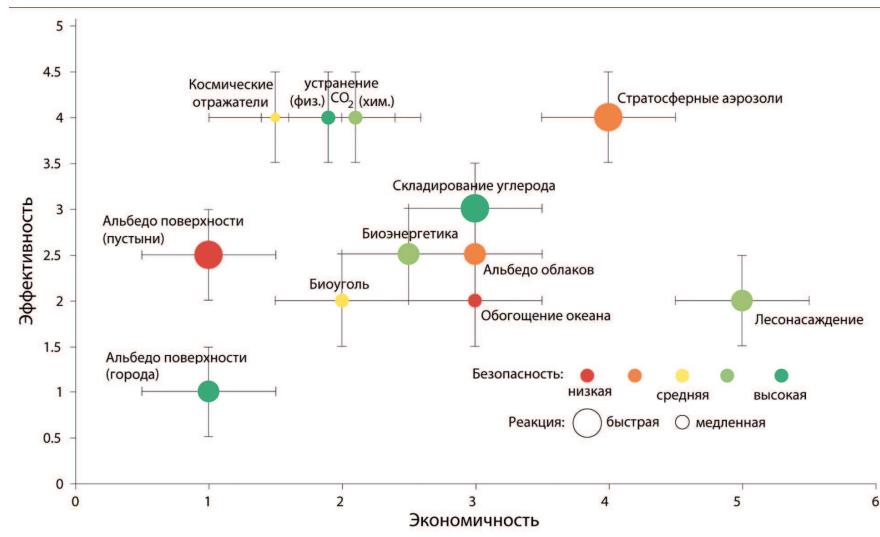


Рис. 8. Предварительная оценка различных технологий геопроектирования

Как видно из диаграммы, сейчас серьезно рассматриваются даже технологии геопроектирования, которые можно отнести к разряду весьма экзотических. К ним относятся системы космических отражателей, создание «зонтиков» из лунной пыли, обогащение Мирового океана «железом» и т.д. Ниже мы кратко рассмотрим только два наиболее реальных метода: инъекции стратосферных аэрозолей (сульфатов) и повышения отражательной способности низких морских облаков, поскольку они могут быть практически реализованы уже в ближайшее время.

Сложность постановки задачи и неоднозначность возможных последствий «геопроектирования» обуславливает выбор в качестве основного инструментария для исследования проблемы методы математического моделирования.

Методы математического моделирования

Для проведения расчетов характеристик поля радиации в атмосфере в настоящее время могут быть использованы три программных комплекса с открытым исходным кодом. 1) Пакет CRM (Column Radiation Model), представляющий собой автономный блок радиационных расчетов, используемый в одной из лучших климатических моделей Национального центра атмосферных исследований (NCAR) США. 2) Пакет libRadtran, являющийся новейшим инструментальным средством, представляющим комплекс программ для расчета характеристик излучения в атмосфере с максимальными точностями. Важным достоинством комплекса является возможность интеграции в него быстродействующего программного пакета Streamer, реализующего важный с точки зрения получения оценок составляющих РБЗ двухпотоковый метод расчета. 3) Программный комплекс Fluxnet, реа-

лизующий нейросетевую версию пакета Streamer и позволяющий вычислять нисходящие и восходящие потоки коротковолнового и длинноволнового излучения с беспрецедентно высокими вычислительными скоростями.

Стратосферные аэрозоли – сульфатная завеса

Результаты анализа спутниковых наблюдений конкретных локальных явлений: сильных извержений вулканов Эль-Чичон и Пинатубо и их последствий (как отмечалось выше) показали, что инжектированные в ходе извержений в нижнюю стратосферу сульфатные аэрозоли способствовали понижению в течение 1-3 лет температуры в северном полушарии на несколько десятых градуса. Основываясь на этом, в последнее годы голландский метеоролог, нобелевский лауреат Пауль Крутцен, активно отстаивает теорию, согласно которой один из главных промышленных загрязнителей - сера - способен минимизировать парниковый эффект. В августе 2006 г. на конференции по глобальному потеплению в Тель-Авиве Крутцен заявил, что инжекция в атмосферу одного миллиона тонн серосодержащих соединений в год приведёт к понижению средней температуры на планете до такой степени, что антропогенный парниковый эффект будет минимизирован. Крутцен тогда ссылался на результаты расчётов, произведённых с помощью "наилучших современных моделей" климата. В последнее время были произведены дополнительные расчёты, которые подтверждают его идею [10]. На рис. 9 приведен результат моделирования, который показывает, что даже при удвоении содержания CO_2 , внесение сульфатов в нижнюю стратосферу позволяет снизить инсоляцию на 1.84% и тем самым практически устранить антропогенный парниковый эффект.

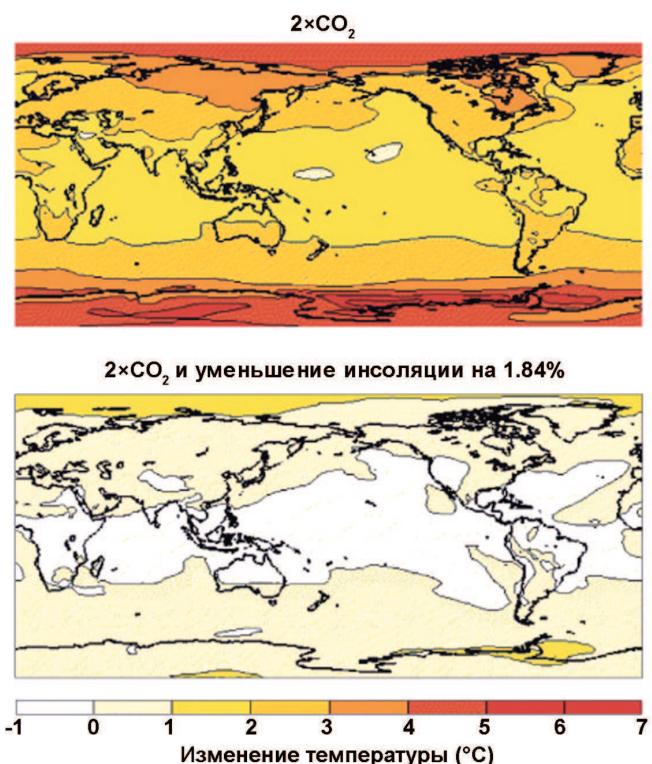


Рис. 9. Результат математического моделирования последствий инжекции сульфатов в нижнюю стратосферу

В сущности, сама идея бороться с глобальным потеплением с помощью сульфатов не нова. В 1974 году М.И.Будыко выдвинул идею о возможности снижения положительного радиационного форсинга за счет внесения в нижнюю стратосферу сернистого ангидрита (SO_2). Однако её даже не обсуждали, пока это предложение повторно не сделал Крутцен, получивший в 1995 году Нобелевскую премию в области химии за свои исследования озонового слоя. Теперь даже гринписовцы считают, что идея Крутцена подлежит не только обсуждению, но возможно и реализации.

Увеличение альбедо низких облаков

В числе альтернативных подходов, в частности, рассматривается модель искусственной генерации морских облаков нижнего яруса с повышенными отражательными характеристиками. Английский ученый Джон Латхэм, специалист по физике облаков, предложил бороться с глобальным потеплением путем отбеливания облаков над морем с помощью автоматических судов, не загрязняющих окружающую среду, которые бы распыляли микроскопические капли морской воды вверх [11]. Основной механизм действия аэрозольного отражения довольно прост. Количество солнечного света, отраженного облаком, зависит от площади поверхности капель воды, которые его образуют. Добавление мелкодисперсных частиц в атмосферу (потенциальных ядер конденсации) способствует образованию большего числа маленьких капель, вследствие чего облака визуально становятся белее и приобретают большую отражательную способность (эффект Твомея). Существует рабочий проект, который выглядит весьма интересным: «В сущности, это лейка в виде кремниевой пластины с миллиардом протравленных отверстий меньше микрона в диаметре; она должна быть установлена на автоматическом судне, управляемом со спутника». Конкретнее, это должно быть судно с ротором Флетнера — высоким вращающимся баллоном (в конструкции двигателя судна используется эффект Магнуса). В настоящее время уже существуют опытные образцы плавучих средств, способные с помощью восходящих струй мелкодисперсных фракций морской воды и воздуха стимулировать увеличение отражательной способности облаков. На рис. 10 показан результат моделирования, представляющий пространственное распределение 5-летней средней аномалии радиационного антифорсинга на ВГА при искусственном повышении с помощью данной технологии концентрации ядер конденсации (увеличение CCN со $100/\text{cm}^3$ в обычных условиях до $375/\text{cm}^3$) в регионах с низкими морскими облаками.

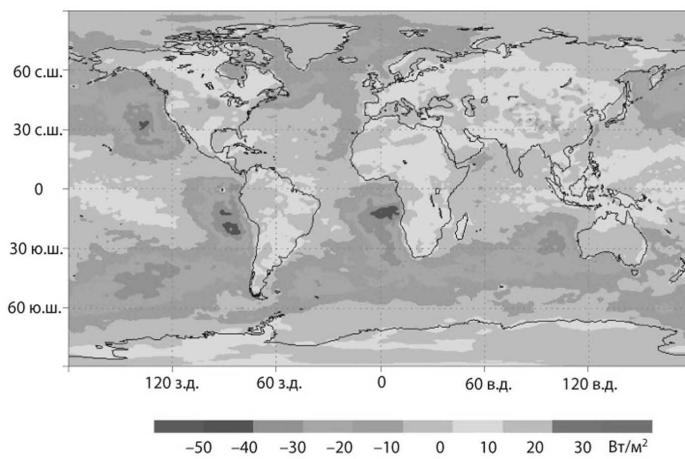


Рис. 10. Результат математического моделирования радиационного антифорсинга при искусственном увеличении отражательной способности низких морских облаков

Было подсчитано, что 1500 судов, каждое из которых будет разбрьзгивать 36 л морской воды в секунду, смогут компенсировать глобальное потепление даже при условии возрастании СО₂ в два раза. Если разместить суда на акваториях, составляющих всего лишь 4% общей площади Мирового океана, то, согласно результатам моделирования, основная задача уже может считаться почти решенной.

Заключение

Сложность рассматриваемой проблемы геопроектирования и неоднозначность возможных откликов климатической системы в целом на управляемые воздействия на атмосферу, направленные на важнейший, но не единственный механизм стабилизации климата: снижение темпов положительного радиационного форсинга, с одной стороны, и необходимость поиска и научного обоснования новых технологий, основанных, в том числе на возможностях искусственных воздействий на атмосферу, обеспечивающих только позитивные эффекты без серьезных побочных последствий на климатическую систему, с другой стороны, делают всестороннее математическое моделирование единственным адекватным инструментом продвижения в этой актуальной проблеме современности.

Несмотря на понимание мировым, в том числе научным, сообществом важности 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.) с точки зрения глобальных, в масштабах всего земного шара, изменений, для разных стран объективно существуют региональные приоритеты, которые необходимо учитывать, в том числе и с точки зрения нахождения консенсуса. Если говорить о России, то таким приоритетом в рассматриваемой проблеме являются климатические изменения в арктическом регионе. Таяние арктических льдов, хотя и не приводит к повышению уровня океана, но может быть опасно по другим причинам. Кроме усиления положительной обратной связи, способствующей дополнительному разогреву вследствие инверсии альбедо, исчезновение льдов будет способствовать активизации огромных залежей метан-гидрата на шельфе Ледовитого океана. При этом возможен резкий выброс метана в атмосферу. Парниковый эффект самого метана и дополнительного оксида углерода, возникающего при его окислении, могут привести к климатической катастрофе [12].

Глобальная температура возрастает пока достаточно медленно, но когда будет исчерпана аккумулирующая способность Мирового океана, может начаться действительно экстремальное глобальное потепление, что непременно скажется на проявлении аномальных природных явлений и, в первую очередь, на быстром повышении уровня Мирового океана, а также усиливающейся активности тропических циклонов. Частые и мощные тропические циклоны способствуют перемешиванию верхнего слоя океана, что постепенно способствует прогреву его глубин. Повышение уровня Мирового океана происходит не только вследствие роста его средней температуры, но и за счет таяния ледников Антарктиды и Гренландии. Изменение основных характеристик Мирового океана может способствовать кардинальному изменению морских течений, в частности, Гольфстрима. В дополнение ко всему перечисленному потепление климата не исключает появление новых, неизвестных ранее болезней, грозящих пандемией. У человечества остается не так уж много времени на размышления, оно должно действовать.

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

Литература

1. Kandel R., M. Viollier, P. Raberanto, J.-Ph. Duvel, L.A. Pakhomov, V.A. Golovko, A.P. Trishchenko, J. Mueller, E. Raschke, R. Stuhlmann, and the International ScaRaB Scientific Working Group (ISSWG) // The ScaRaB Earth Radiation Budget Dataset // Bulletin of the American Meteorological Society, 1998. Vol. 79. No.5. P.765-783.
2. J.-Ph. Duvel, M. Viollier, P. Raberanto, R. Kandel, M. Haefelin, L.A. Pakhomov, V.A. Golovko, J. Mueller, R. Stuhlmann and the International ScaRaB Scientific Working Group (ISSWG) // The Sca-Rab-Resurs Earth Radiation Budget Dataset and First Results. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001. Vol. 82. No.7. P.1397–1408.
3. Головко 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.
4. Головко В.А. Глобальное перераспределение составляющих радиационного баланса Земли. // Исследование Земли из космоса, 2003. №6. С.3-13.
5. Головко В.А. Диагностика и прогноз динамики пространственных изменений поля уходящего длинноволнового излучения Земли. // Исследование Земли из космоса", 2004. №5. С.3-14.
6. Головко В.А., Кондранин Т.В. Изучение радиационного баланса Земли по данным космического мониторинга // М.: МФТИ, 2007. Учебное пособие. 174c.
7. Golovko V. A. The Earth Radiation Budget – Twenty Years Later (1985-2005) // Global Climatology and Ecodynamics: Anthropogenic Driven Changes to Planet Earth, Springer/Praxis, Chichester, UK, 2008. P.29-41.
8. 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.
9. Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty // The Royal Society, 2009. 98p.
10. Caldeira K., Wood L. Global and Arctic climate engineering: numerical model studies // Phil. Trans. R. Soc. A 2008 366, doi: 10.1098/rsta.2008.0132. P. 4039-4056
11. Latham J., et al, Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds // Phil.Trans.R.Soc.A, doi:10.1098/rsta.2008.0137
12. Бялко А.В. Кризис? – Нет: завершение прогресса // URL: <http://www.byalko.ru>

Geophysical aspects of radiation balance components artificial correction for Earth's climate stabilization

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 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. Modern space monitoring shows that Earth is now absorbing more energy from the Sun than it is emitting to space. This imbalance is confirmed by measurements of increasing ocean heat content over the past 30 years. Implications include the expectation of additional global warming without further change of atmospheric composition. Geoengineering proposals aim to intervene in the climate system by deliberately modifying the Earth's energy balance to reduce increases of global temperature and eventually stabilize it at a lower level than would otherwise be attained.

Keywords: Earth's radiation balance, global warming, radiation forcing, geoengineering.