

## Энергетические аспекты изменения климата Земли: взгляд из космоса

В.А. Головко

ФГБУ 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. Современный космический мониторинг показывает, что Земля поглощает энергии 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 существенного изменения состава атмосферы. Предложения по геоинженерингу 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, геопроектирование.

### Введение

Климат Земли неразрывно связан 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 космического базирования и постоянно возрастающий объем данных наблюдений позволяют сегодня с большей достоверностью представить обобщенную картину важных изменений в климатической системе Земли (Loeb et al., 2012a). В настоящее время координирующую роль в организации и валидации космических наблюдений РБЗ осуществляет международная научная группа CERES (CERES Science Team) под руководством Нормана Лоеба (Norman Loeb). Ученые и специалисты разных стран, объединенные координирующей деятельностью группы CERES, ставят перед собой следующие задачи: 1. Обеспечить непрерывность долгосрочных космических наблюдений радиационного баланса на верхней границе атмосферы (ВГА), в атмосфере и на поверхности Земли, согласующихся с метеорологическими данными, включая данные об облаках и аэрозолях; 2. Проводить исследования, направленные на углубленное понимание причин изменчивости РБЗ и роли облаков в этих процессах; 3. Обеспечить получение общедоступных информационных продуктов для оценки и совершенствования моделей климата.

Основным инструментом диагностики и прогноза возможных изменений климата является исследование его чувствительности по отношению к различным факторам (Головко, 2011). 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» (Головко, 2010). В настоящее время в качестве наиболее эффективного и наименее опасного метода противодействия глобальному потеплению может рассматриваться инжекция в атмосферу аэрозолей (Израэль и др., 2009).

### **Космический мониторинг радиационного баланса Земли**

Важность слежения за энергетическими потоками на верхней границе атмосферы (ВГА) Земли в настоящее время очевидна. Современные методы космического мониторинга позволяют осуществлять контроль всех трех составляющих РБЗ: приходящей солнечной радиации (ПСР), уходящей коротковолновой радиации (УКР) и уходящей длинноволновой радиации (УДР). Весь период активных космических наблюдений за РБЗ можно условно разделить на три основных этапа: 1. Экспериментальные измерения с помощью ERBE, СРРБ/ScaRaB и CERES (1980-2000 гг.), 2. Оперативный мониторинг EOS/A-Train (Terra, Aqua), Meteosat (MSG 1,2) с помощью CERES, MODIS, GERB (2000-2010 гг.), 3. Современный мониторинг EOS/A-Train, NPP, Meteosat (MSG 3), Megha-Tropiques с помощью CERES, MODIS, VIIRS, GERB3, ScaRaB-3 (2010-последующие годы). В последние годы научной группой CERES была проведена большая работа по контролю и нормализации ранее полученных радиационных данных (Loeb et al., 2012a) и сейчас все заинтересованные специалисты имеют открытый доступ к упорядоченному архиву данных (2-го этапа) за период с марта 2000 г. по июнь 2012 г. К важным достижениям группы CERES последних лет следует отнести появление экспертных оценок достоверности (доверительные интервалы) значений составляющих РБЗ, дающих представление о том, насколько оправданной может быть та или иная интерпретация имеющихся результатов наблюдений.

Результат космического мониторинга РБЗ на ВГА может быть представлен выражением:

$$R = Q(1 - A) - L$$

где  $Q$  – приходящая солнечная радиация (ПСР), определяемая интегральной солнечной постоянной (ИСП)  $S_0$  (при этом с учетом фактора глобального усреднения  $\frac{1}{4}$  получаем  $Q=S_0/4$ ),  $A$  – альбедо Земли,  $L$  – уходящая длинноволновая радиация (УДР).  $QA$  определяет уходящую коротковолновую радиацию (УКР). Если определить коальбедо Земли соотношением  $\gamma = 1 - A$ , то величина  $P = Q\gamma$  определяет поглощенную коротковолновую радиацию (ПКР). Современные оценки текущих глобальных средних значений, полученные в основном с помощью измерений аппаратурой CERES, представлены рис. 1. На рисунке значения энергетических потоков имеют размерность  $\text{Вт}/\text{м}^2$  и представлены положительными числами для входящих потоков и отрицательными – для уходящих. Современное значение ИСП на ВГА составляет 1364  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , что соответствует ПСР равной 341  $\text{Вт}/\text{м}^2$ . Численные значения других компонент составляют для УКР –  $100 \pm 1 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , соответствующее альбедо  $A = 0.29$ , для УДР –  $240 \pm 2 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , из которых  $186 \pm 10 \text{ Вт}/\text{м}^2$  приходится на длинноволновое атмосферное выхолаживание, а  $54 \text{ Вт}/\text{м}^2$  ( $398 \pm 3$  -  $344 \pm 7$ ) на излучение поверхностью. Эти значения заметно отличаются от данных, полученных с помощью ERBE и СРРБ (УКР – 107

Вт/м<sup>2</sup>, УДР – 234 Вт/м<sup>2</sup>) в период их функционирования (Головко и др., 2003а,б), т.е. значения УДР несколько возросли, а УКР – уменьшились. Современное значение ПКР составляет 240 Вт/м<sup>2</sup>, из них поглощение атмосферой составляет 77±7, а земной поверхностью 163±7 Вт/м<sup>2</sup>. Текущая оценка глобального дисбаланса составляет +0.5±0.26 Вт/м<sup>2</sup>. Это свидетельствует о том, что Земля получает от Солнца энергии больше, чем её излучает в космическое пространство, т.е. идет нагрев нашей планеты (в основном скрытый, что более подробно обсуждается ниже).

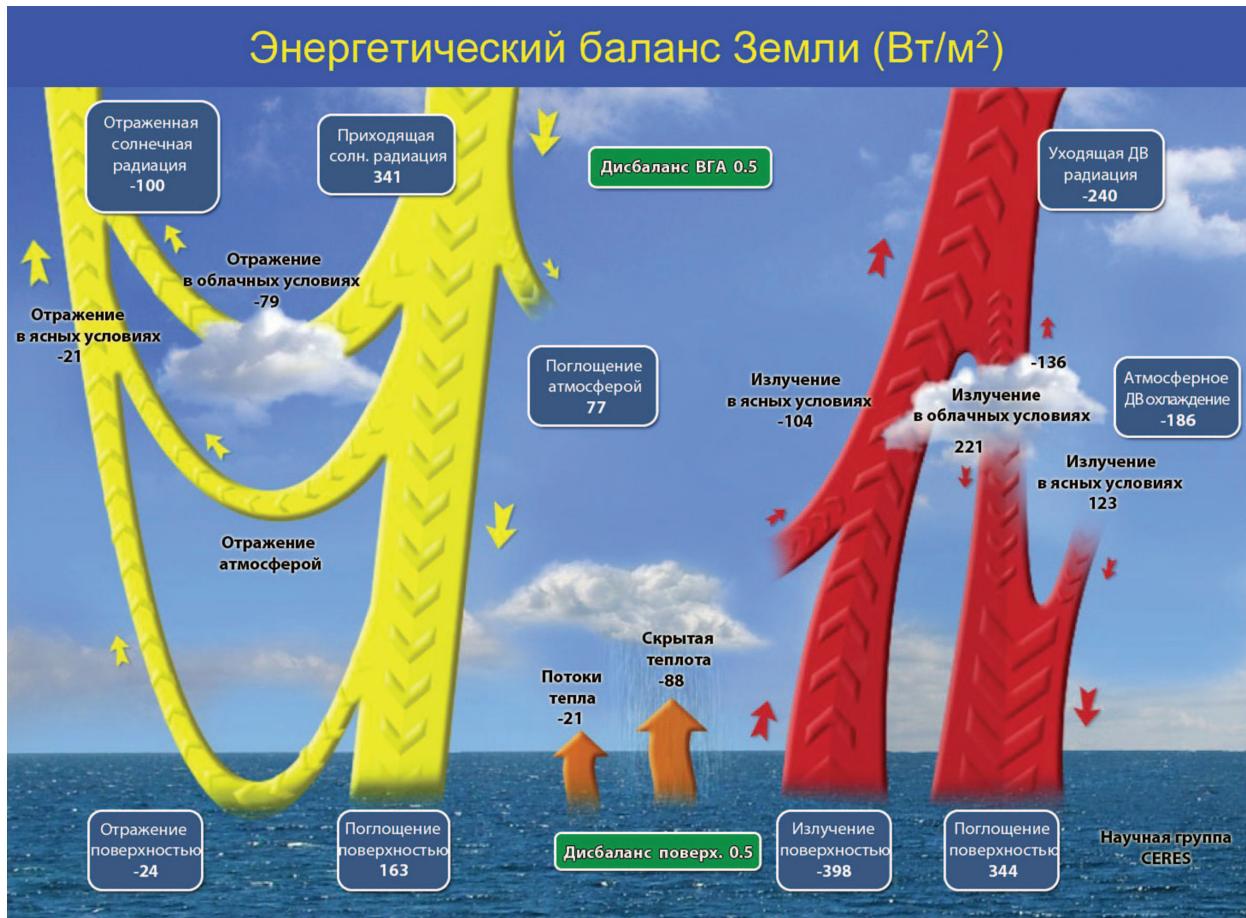


Рис. 1. Составляющие глобального энергетического баланса Земли

Длительные космические наблюдения (более 30 лет) дают возможность представить эмпирические доказательства существования современного энергетического дисбаланса Земли, отмеченные еще на основе данных 1-го этапа наблюдений 1980-2000гг. (Головко, 2003б, 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, Кондранин, 2007). Слежение за особенностями энергетического состояния Земли является важным инструментом исследований не только в глобальной климатологии, но и в экодинамике (Golovko, 2008).

Нужно отметить, что на рис. 1 схематически представлен не радиационный, а энергетический баланс Земли, включающий не только радиационные составляющие, но и основные потоки тепла. Дисбаланс земной поверхности по современным оценкам составляет +0.5 Вт/м<sup>2</sup>. Радиационный дисбаланс между поверхностью и атмосферой определяет, сколько энергии доступно для реализации в гидрологическом цикле и для тепловых потоков

между поверхностью и атмосферой. Радиационный дисбаланс между низкими и высокими широтами способствует переносу тепла от экватора к полюсам атмосферой и океанами. Региональная структура радиационного баланса приводит в действие атмосферную и океаническую циркуляцию.

На рис. 2 отражены особенности широтного хода радиационного баланса, полученные по данным наблюдений 2-го этапа (2000-2010 гг.) и следствия энергетического дисбаланса, приводящие к общей циркуляции атмосферы.

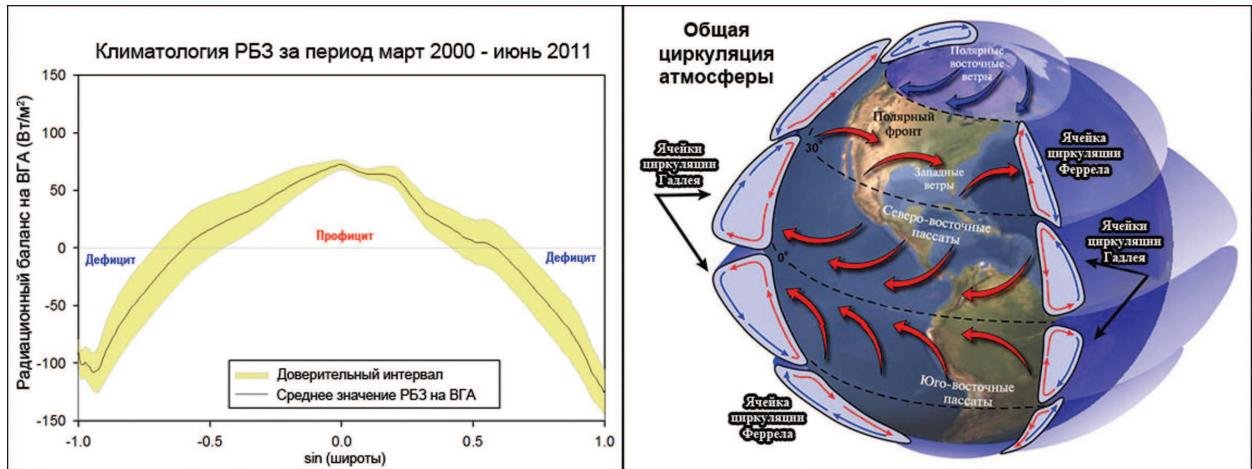


Рис. 2. Особенности широтного хода радиационного баланса по данным научной группы CERES (слева) и общей циркуляции атмосферы (справа)

Несмотря на то, что в последнее время достигнут существенный прогресс в формировании качественных рядов данных радиационных наблюдений, к сожалению, приходится констатировать, что проблема необходимой точности радиационных измерений всё ещё не решена. Величина РБЗ достаточно мала и может быть менее 1 Вт/м<sup>2</sup>, а знать мы её должны с точностью до долей, вычисляя на основе спутниковых измерений как разность двух достаточно больших величин (около 340 Вт/м<sup>2</sup>). Даже для относительной погрешности измерений CERES 0.2% мы получаем оценку абсолютной погрешности (при УКР~100 Вт/м<sup>2</sup>, УДР~240 Вт/м<sup>2</sup>):  $\sqrt{0.2^2 + 0.48^2} = 0.52$ , т.е. около 0.5 Вт/м<sup>2</sup>. Что в смысле абсолютной точности наблюдений явно недостаточно для адекватной оценки РБЗ.

Лучше всего обстоят дела с измерениями приходящего солнечного излучения (см. рис. 3). В настоящее время можно сделать вывод, что отсутствует статистически значимый тренд изменения интегральной солнечной постоянной (ИСП). На рубеже XXI-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. 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 всего + 0.004% в десятилетие, что не является статистически значимым, т.е. означает, что ИСП фактически не изменяется.

Но внешний радиационный форсинг приходящего солнечного излучения, хотя и является важнейшим фактором воздействия на климатическую систему Земли, но все-таки не является единственным, определяющим текущие климатические изменения, и здесь важную роль играют обратные связи.

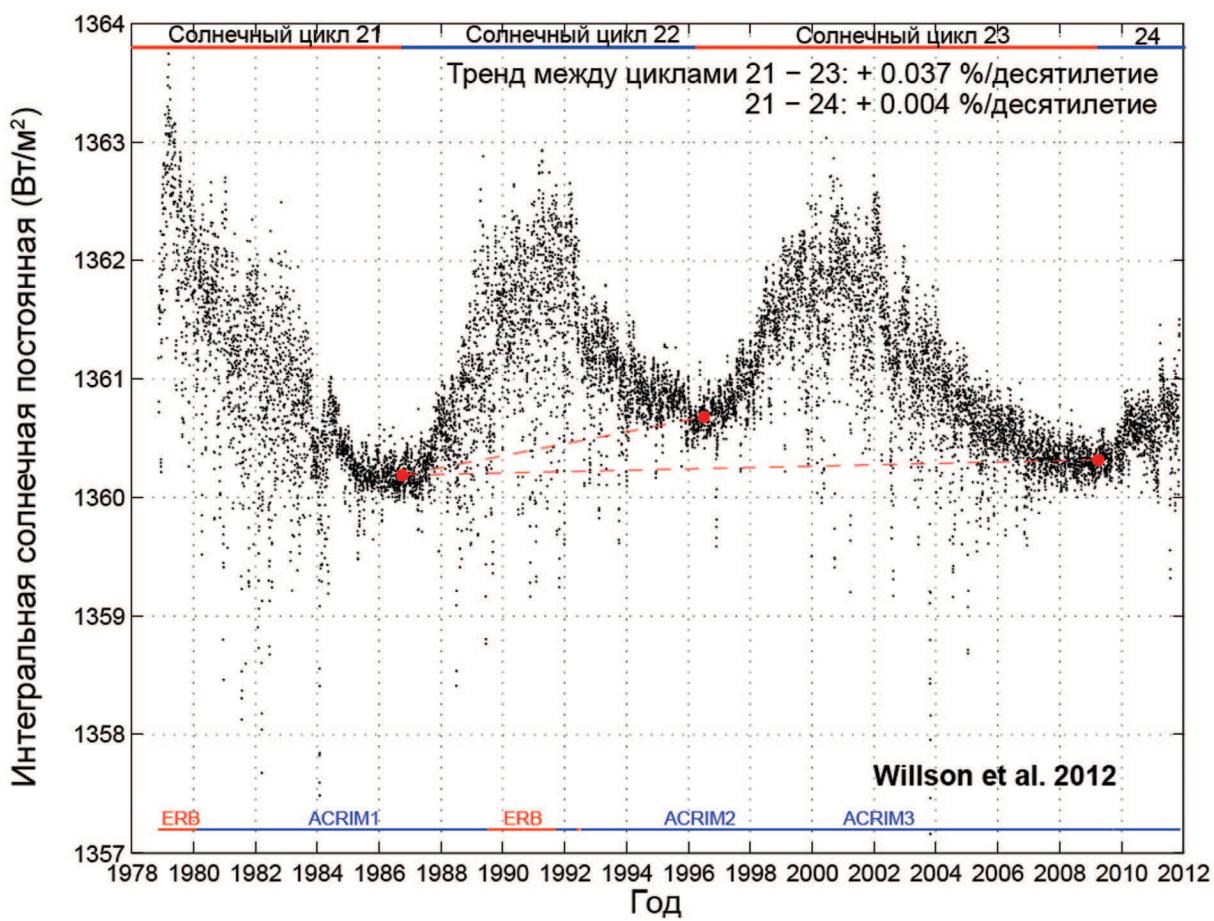


Рис. 3. Временной ход значений интегральной солнечной постоянной (ИСП) по данным космического мониторинга

### Роль облачности в климатической системе

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 солнечное 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.

Результаты современных исследований научной группы CERES показывают, что радиационный эффект облачности на РБЗ всё-таки скорее отрицательный. Так на ВГА (по данным SORCE-TIM, CERES, MODIS и 5-ти геостационарных спутников) эффект составляет  $-20.9 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . В атмосфере (по данным MODIS, GMAO, AIRS, CALIPSO и CloudSat) эффект практически отсутствует (равняется всего  $+0.4 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ) вследствие компенсации коротковолнового нагрева и длинноволнового охлаждения. На поверхности (по данным MODIS

и NSIDC) эффект влияния облачности составляет  $-21.3 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Это предварительные результаты и полученные данные требует дополнительных уточнений.

Еще двумя очень важными внутренними климатическими факторами являются изменение теплосодержания Мирового океана и феномен Эль-Ниньо.

### Изменение теплосодержания Мирового океана

Выше отмечалось, что Земля в настоящее время получает в среднем на  $0.5 \pm 0.26 \text{ Вт}/\text{м}^2$  энергии больше, чем ее излучает в космическое пространство. 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 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.

Мировой океан имеет поистине феноменальную «теплоемкость», только его уникальная тепловая инерционность спасает нас от экстремального проявления глобального потепления. На рис. 4 (Levitus et al., 2012) показан рост теплосодержания верхних слоев (0-700-2000 м) океана. Изменения приведены относительно базового периода 1955-2006 гг.

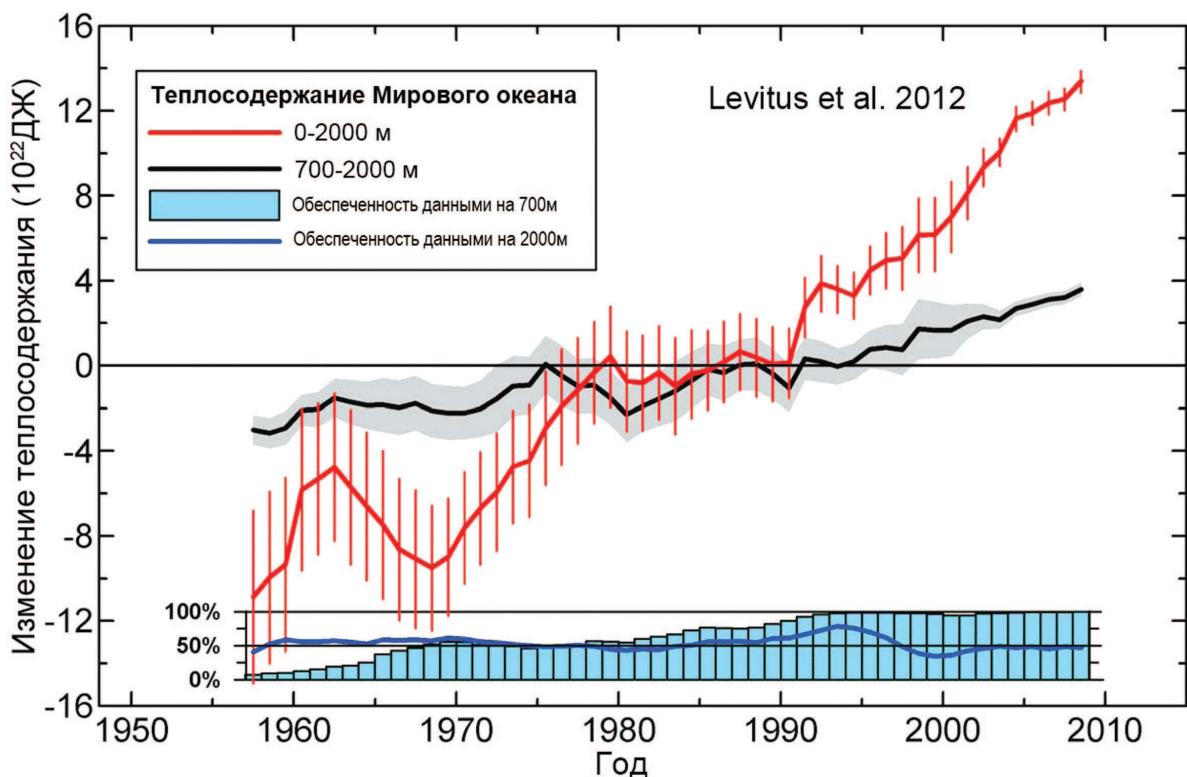


Рис. 4. Временной ход изменения теплосодержания двух слоев Мирового океана (0-2000 м, 0-700 м) и их информационная обеспеченность

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 CO<sub>2</sub>. Полный цикл термогалинной циркуляции в океане составляет 1-2 тысячи лет.

Да, климат Земли обладает существенной тепловой инерционностью. 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.

### **Явление Эль-Ниньо/Южное колебание (ЭНИОК)**

Явление Эль-Ниньо обусловлено сбоем циркуляции в тропической атмосфере, связанной с так называемой ячейкой Уолкера. По не выясненным пока до конца причинам с интервалом в 3-7 лет пассаты (см. рис. 2) ослабевают, нарушаются баланс, и теплые воды западного бассейна устремляются на восток, создавая одно из самых сильных теплых течений в Мировом океане на площади порядка  $10^7$  км<sup>2</sup>. Это приводит к резкому повышению температуры (на 5-9 °C) поверхностного слоя воды на востоке Тихого океана. По некоторым оценкам энергия, выбрасываемая океаном в атмосферу за сутки в районе действия Эль-Ниньо, может составлять порядка  $10^{21}$  Дж, что соизмеримо с энергией всей атмосферы  $\sim 10^{22}$  Дж. Это означает, что хотя сами процессы, развивающиеся при фазе Эль-Ниньо, региональны, тем не менее, их последствия с некоторым временным лагом носят глобальный характер. А это в свою очередь может приводить к экологическим катастрофам, имеющим место в последующие после Эль-Ниньо годы.

Обычно через год после Эль-Ниньо феномен вступает в противоположную фазу, так называемую Ла-Нинья, когда восточная часть Тихого океана переохлаждается. По своему воздействию на климатическую систему фаза Ла-Нинья сопоставима с влиянием Эль-Ниньо. Смена фаз Эль-Ниньо и Ла-Нинья определяет важную климатическую осцилляцию Эль-Ниньо/Южное колебание (ЭНИОК). Существует несколько климатических индексов, характеризующих временной ход событий явления ЭНИОК. Длительное время в климатических исследованиях использовались одномерные индексы, основанные на анализе только одной переменной: либо приповерхностного давления (SLP), либо температуры морской поверхности (SST). Примерами таких индексов являются SOI и Niño 3.4 SST. В последнее время наибольшую популярность среди исследователей приобрел так называемый «Многомерный индекс ЭНИОК» (Multivariate ENSO index) или сокращенно МИЭ (MEI), предложенный специалистами NOAA и Колорадского университета (Wolter, Timlin, 2011). МИЭ рассчитывается как интегральный показатель (первая главная компонента) на основе 6-ти переменных, наблюдаемых над тропической акваторией Тихого Океана: приповерхностного давления, зональной и меридиональной компонент скорости приповерхностного ветра, температуры поверхности океана, температуры приповерхностного воздуха и степени покрытия облаками. Детальную информацию о МИЭ, а также доступ к архивным данным индекса можно получить по адресу: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/mei.html>. Временной ход МИЭ, обновленный в ноябре 2012 г., приведен на рис. 5. Анализ МИЭ позволяет, в частности, частично объяснить изменившиеся в последнее время темпы глобального потепления.

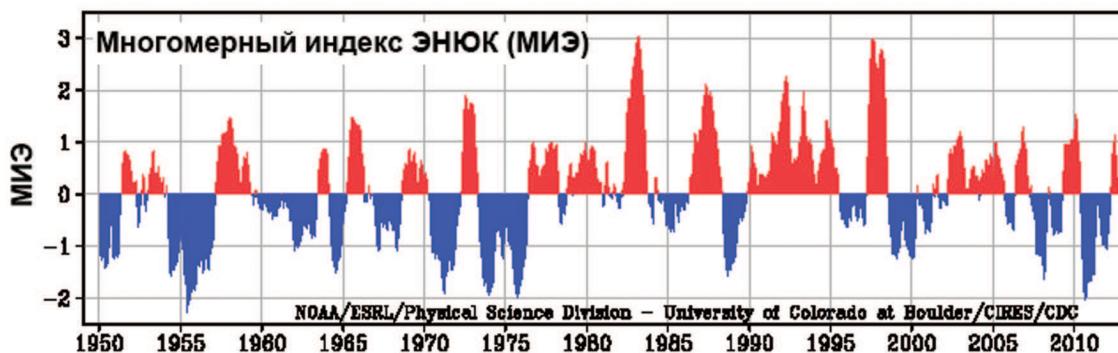


Рис. 5. Временной ход значений Многомерного Индекса ЭНЮК (МИЭ)

Из данных, приведенных на рисунке, видно, что в 2008-2010 гг. преобладала холодная фаза ЭНЮК – Ла-Нинья, причем в 2010 г. это явление было выражено аномально сильно (на рис. 4 отображено сдвоенными глубокими минимумами). Возникает вопрос, насколько сильно региональное тропическое явление ЭНЮК может влиять на приземную температуру в других регионах земного шара и в глобальном масштабе в целом. Оказывается, может влиять весьма значительно, только с некоторым запаздыванием (более 4 мес.), определяемым инерционностью климатической системы. Например, сильнейшее за всю историю наблюдений явление Эль-Ниньо 1997 г. стало, по мнению специалистов (Hansen et al., 2012), основной причиной аномально теплого 1998 г. (рекордно теплого вплоть до 2010 г.). Наоборот, 2011 г., несмотря на тренд глобального потепления, оказался даже несколько холоднее 1998 г. вследствие проявления влияния сильнейшей фазы Ла-Нинья, имевшей место в предшествующий период.

### Динамика глобального потепления

Прошло около пяти лет с момента завершения работы над Четвертым докладом Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) в 2007 г. Поскольку Пятый доклад ожидался не ранее 2013 г., а ситуация с глобальным потеплением становилась все более угрожающей, был выпущен промежуточный доклад, приуроченный к проведению Климатической конференции на высшем уровне в Копенгагене в декабре 2009 г. Это событие не обошлось без обострения дискуссии на тему, является ли действительно глобальное потепление угрожающей реальностью для человечества. Важный вклад в прояснение ситуации внесли последующие публикации авторитетного специалиста по мониторингу приземной температуры Джеймса Хансена (Hansen et al., 2010-2012). Годдардский институт космических исследований НАСА (NASA GISS) совместно с Колумбийским университетом проводят регулярные обновления глобальных данных о приземной температуре, в частности, данные, уточненные в 2012 г., представлены на рис. 6. в виде температурной аномалии по отношению к базовому периоду 1951-1980 гг., зеленым цветом отмечены доверительные интервалы, характеризующие достоверность представленных значений. На основе результатов тщательного анализа самым теплым за 132-летнюю историю инструментальных наблюдений был признан 2010 г. И хотя последующий 2011 г. занимает только девятое место в перечне самых теплых лет, говорить о временном прекращении или даже замедлении глобального потепления преждевременно. За последние 30 лет (1980-2010 гг.) потепление наблюдалось во всех широтных зонах, однако наиболее значительный рост температуры был зафиксирован в северных широтах (правая панель рис. 6). Важнейшим аргументом про-

должения глобального потепления является факт наиболее теплого 2010 г. в период фазы Ла-Нинья и «спокойного» Солнца. С учетом временного лага воздействия явления ЭНЮК, переходящего в теплую фазу Эль-Ниньо в 2012 г., и нарастания активности Солнца следующий максимум глобального потепления следует ожидать в 2013-2014 гг.

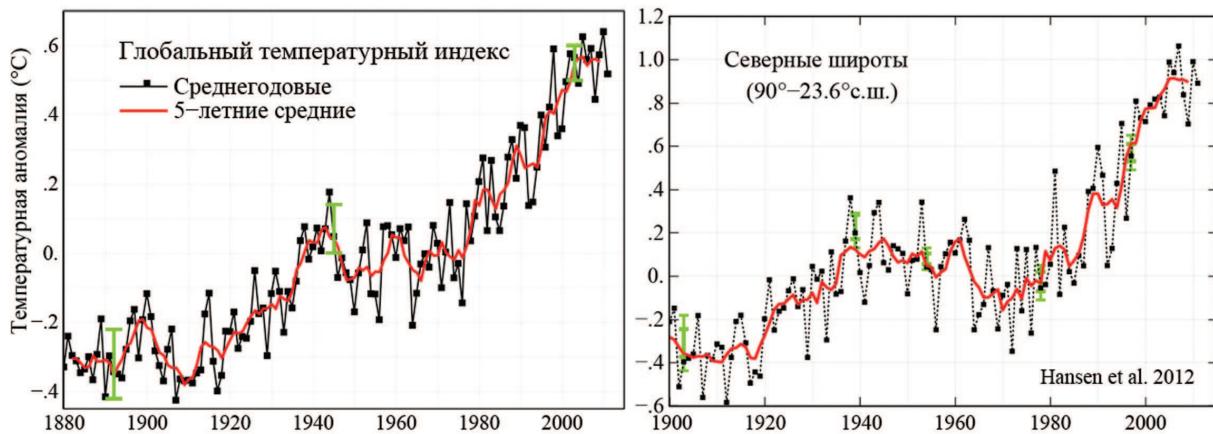


Рис. 6. Значения температурных аномалий для всей поверхности земного шара (слева) и для северных широт (справа)

Глобальное потепление реальность, которая уже практически 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.

### Кардинальные изменения в Арктике

Как уже отмечалось выше, наибольшее проявление глобального потепления наблюдается в северном полушарии в высоких широтах. Стоит более подробно остановиться на двух важнейших последствиях этого экстремального потепления: катастрофических явлениях уменьшения степени покрытия морскими льдами Арктического бассейна и таяния ледников Гренландии.

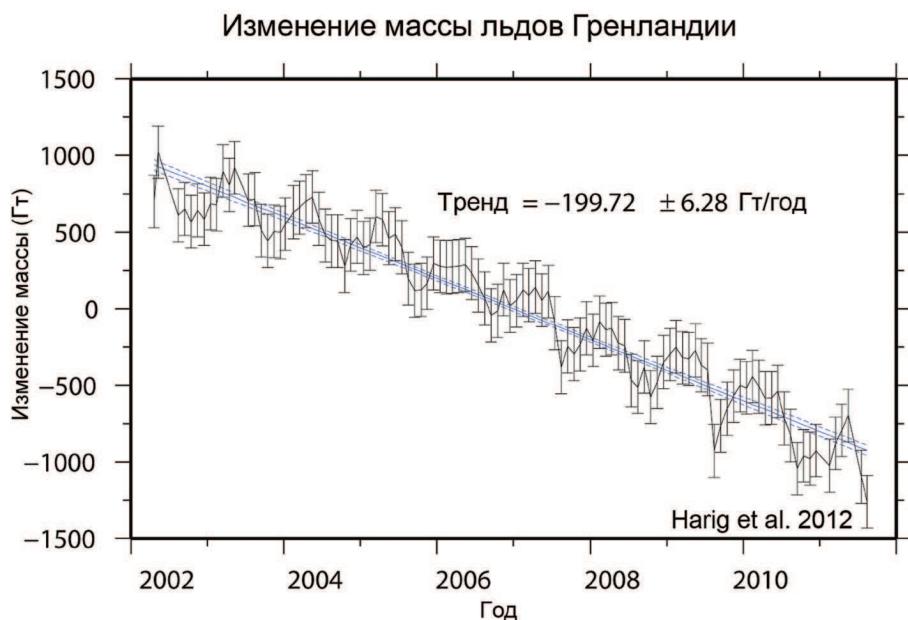
В 2012 году (16 сентября) был достигнут абсолютный минимум покрытия льдами Арктики – 3.4 млн. кв. км. Это значение оказалось на 760 тыс. кв. км меньше, чем минимум, достигнутый 18 сентября 2007 г. На рис. 7 представлены данные космического мониторинга ледовой обстановки в Арктике, подготовленные Национальным центром данных снега и льда США (NSIDC). Аномалии приведены относительно базового периода 1979-2000 гг. Из данных, приведенных на рисунке, видно, что минимум 2012 г. на 18% ниже минимума 2007 г. и на 49% ниже средней величины за 1979-2000 г.

Следует заметить, что таяние арктических морских 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 (переходу от крайне высоких значений для льда/снега к крайне низким значениям для открытой воды), исчезновение льдов будет способствовать активизации огромных залежей метан-гидрата на шельфе Ледовитого океана (<http://www.sciencemag.org/content/327/5970/1246>). При этом возможен резкий выброс метана в атмосферу. Парниковый эффект самого метана и дополнительного оксида углерода, возникающего при его окислении, могут привести к экстремально ускоренному потеплению.



*Рис. 7. Относительное снижение площади покрытия морскими льдами Арктического бассейна за последние 30 лет*

Другой, не менее впечатляющий результат экстремального потепления, это кардинальное уменьшение массы Гренландских ледников. Современная космическая система GRACE, предназначенная осуществлять мониторинг аномалий поля силы тяжести Земли, позволила не только зафиксировать изменение (уменьшение) общей массы ледников Гренландии, но даже провести картирование изменений толщины гренландского ледяного щита. Результаты тщательной обработки данных GRACE применительно к оценке суммарного изменения массы льдов Гренландии за десятилетний период (Harig et al., 2012) представлены на рис. 8. Общее уменьшение массы Гренландских ледников хорошо аппроксимируется отрицательным линейным трендом, составляющим  $-199.72 \pm 6.28$  Гт/год. Потеря ежегодно около 200 гигатонн льда, который превращается в пресную воду и опресняет Атлантический океан в области Гольфстрима – это очень тревожный процесс, повышающий ко всему прочему и уровень Мирового океана.



*Рис. 8. Временной ход изменения массы льдов Гренландии по данным наблюдений космической системой GRACE*

## Перспективные системы космических наблюдений

Анализ современных требований, предъявляемых к перспективным системам космического мониторинга характеристик радиационного поля Земли, привел специалистов к заключению о необходимости создания принципиально нового поколения измерительных приборов, которые придут на смену оперативной системе CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System). Речь идет о разработке и использовании как полномасштабных мультисистем, к которым относится обсерватория CLARREO, так и микросистем, примером которой может служить наноспутник SIMBA.

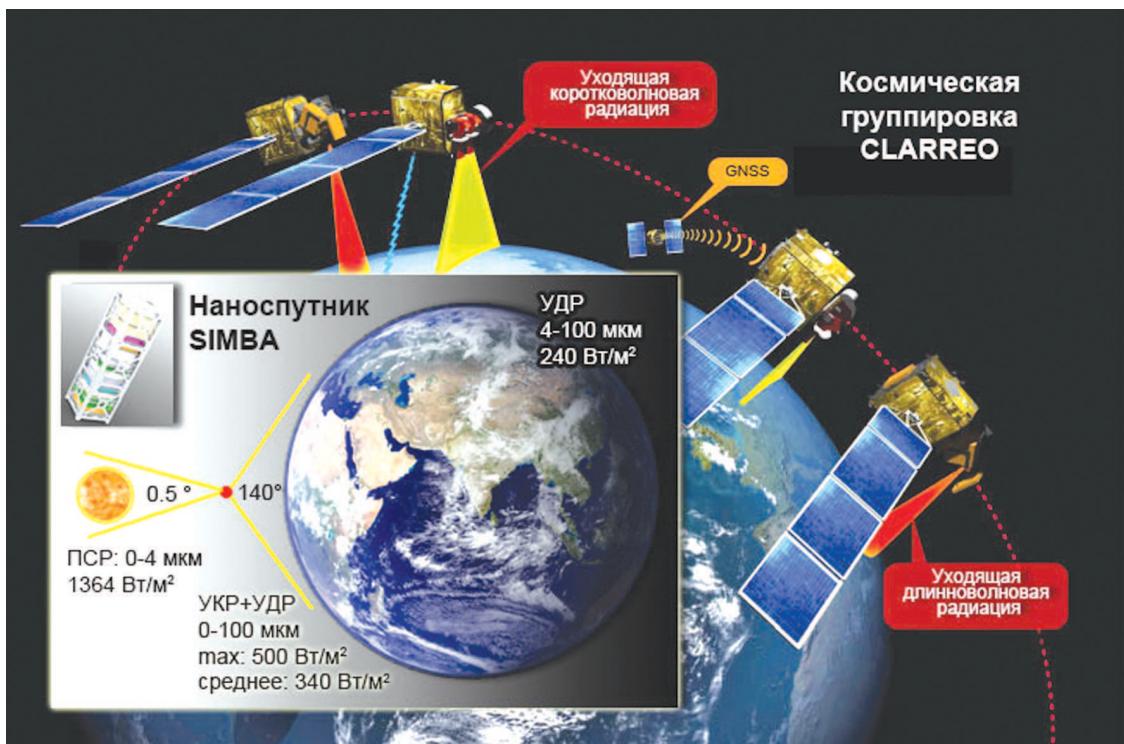
Разработка и запуск космической обсерватории CLARREO (Climate Absolute Radiance and Refractivity Observatory), которая будет интегрировать систему новейших измерительных приборов, объявлены одной из четырех наиболее приоритетных космических миссий ближайшего десятилетия. Более подробно с концепцией миссии CLARREO можно ознакомиться на интернет-странице этого проекта по адресу: <http://clarreo.larc.nasa.gov>. Беспрецедентно высокая точность и стабильность измерений CLARREO позволят в значительной степени решить важнейшие задачи диагностики всех составляющих системы «поверхность-атмосфера» Земли. Главная особенность новейшей системы состоит в переходе от использования радиометров к гиперспектрометрам в качестве основных измерительных приборов.

Космическая группировка CLARREO будет сформирована в период 2018-2020 гг. Измерения с помощью аппаратуры, установленной на сегментах CLARREO, позволят восстанавливать значения практически всех наиболее важных геофизических параметров окружающей среды. Высокая эффективность перехода от одиночных КА к космическим группировкам была первоначально доказана ещё на примере спутниковой системы «А-поезда» и сейчас это становится основным системным подходом. Важной отличительной особенностью обсерватории CLARREO, включающей четыре КА, движущихся друг за другом по одной и той же орбите (см. рис. 9) является возможность взаимной калибровки с широкополосной аппаратурой CERES, а также с другими оперативными зондирующими системами (CrIS, IASI), видеоспектрометрами (такими, как VIIRS), аппаратурой геостационарных систем и т.д.

Другим важным направлением развития перспективных космических систем являются миниатюризация и повышение энергоэффективности отдельных спутников. В качестве примера (новейшей разработки в данном классе систем) можно привести наноспутник SIMBA (the Sun-earth IMBalance radiometer), предназначенный для долговременных наблюдений РБЗ путем контроля как падающего на Землю солнечного излучения, так и полного потока уходящей радиации. Более подробную информацию о наноспутнике SIMBA можно получить в презентации этого проекта по адресу: [http://ceres.larc.nasa.gov/documents/STM/2012-10/Thu\\_17\\_SIMBA\\_summary\\_25102012.pdf](http://ceres.larc.nasa.gov/documents/STM/2012-10/Thu_17_SIMBA_summary_25102012.pdf). Оригинальный дизайн аппаратуры и схема измерений приведены на врезке рис. 9. Планируется, что разработка спутника завершится в 2012 г., до конца 2013 г. он будет изготовлен и протестирован, а в начале 2014 г. будет запущен. Если эксперимент пройдет удачно, то низкая себестоимость создания и запуска таких наноспутников в будущем позволит создавать наблюдательные космические сети.

Однако следует заметить, что все упомянутые космические средства наблюдений (включая и перспективные) служат только для диагностики климатических изменений.

Если предположить, что при неблагоприятном сценарии развития событий с интенсификацией глобального потепления, когда диагноз вдруг станет действительно угрожающим для человечества, то тогда придется использовать технологии активных воздействий на окружающую среду, т.е. геоинженерию.



*Рис. 9. Концепции перспективных спутниковых систем: космической группировки CLARREO и наноспутников типа SIMBA (на врезке)*

### **Развитие технологий геоинженерии**

В настоящее время все большее число специалистов задумываются над тем, как можно было бы стабилизировать климат, чтобы противостоять негативным тенденциям глобального потепления. Базовой концепцией решения этой проблемы является управляемое сокращение поглощаемой Землей приходящей солнечной радиации с целью компенсации антропогенного и природного парникового эффекта. Геоинженерные подходы к стабилизации современного климата подразделяются на две группы (Израэль и др., 2009): 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 стрatosферу 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 возможного противодействия глобальному потеплению является инжекция в атмосферу аэрозолей. Группа российских ученых, занимающаяся обоснованием метода стабилизации современного климата с использованием сульфатных аэрозолей (Израэль и др., 2009) считает, что создание аэрозоль-

ногого 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 инжекций в атмосферу, учитывающие условия образования частиц в стратосфере, их оптические свойства, влияние на параметры климатической системы, характер переноса и выведения из стратосферы. Предварительные оценки потенциальной аномалии глобальной температуры показывают, что при ежегодной инжекции  $\text{SO}_2$  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 инжекцией сульфатов методы (Головко, 2010).

Конечно, любые, даже самые, казалось бы, безвредные активные воздействия на окружающую среду, должны не только контролироваться в реальном масштабе времени на эффективность применения, но и главное на неоднозначность возможных откликов климатической системы. Перспективные космические средства мониторинга в этой связи призваны сыграть ключевую роль. В основу оптимальной технологии получения количественных оценок перераспределения составляющих РБЗ должен быть положен новый синтетический подход, основанный на сочетании анализа моделей переноса излучения и экспериментальных данных в виде временных рядов, полученных на основе многолетнего спутникового мониторинга РБЗ, включая аномальные события, связанные с последствиями крупнейших извержений вулканов.

Такой подход обеспечивает возможность уточнения расчетных моделей и тем самым повышает достоверность результатов расчетов. Имеющиеся ряды многолетних (начиная с 70-х годов прошлого века) глобальных космических наблюдений составляющих РБЗ позволяют детально исследовать пространственно-временную эволюцию составляющих РБЗ как в «спокойные» годы, так и в периоды аномальных природных катализмов, связанных с фактором сильнейших вулканических извержений. Извержения вулканов являются примерами географически локализованной (точечной) инжекции сульфатов в атмосферу на высоты, определяемые мощностью извержений. Поэтому на основании численного моделирования можно получить общую картину возможных трехмерных воздействий (по регионам и высотам).

## 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 геоинженерии.

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/появление 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.

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 приводит к 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. 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.
2. Головко В.А. Глобальное перераспределение составляющих радиационного баланса Земли // Исследование Земли из космоса, 2003. №6. С.3-13.
3. Головко В.А. Диагностика и прогноз динамики пространственных изменений поля уходящего длинноволнового излучения Земли // Исследование Земли из космоса, 2004. №5. С.3-14.
4. Головко В.А., Кондранин Т.В. Изучение радиационного баланса Земли по данным космического мониторинга / М.: МФТИ, 2007. Учебное пособие. 174с.
5. Головко 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. Головко В.А. Радиационный баланс и чувствительность климата Земли: диагностика и геопректирование // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т.8. №2. С. 137-149.
7. Израэль Ю.А., Рябошапко А.Г., Петров Н.Н. Сравнительный анализ геоинженерных способов стабилизации климата // Метеорология и гидрология, 2009. №6. С.5-24.
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. Hansen, J., et al. Earth's energy imbalance and implications // Atmos. Chem. Phys., 2011. 11. P. 13421–13449.

11. Hansen J., et al. Perception of climate change // PNAS, 2012, 109, 37, P. E2415–E2423.
12. Harig C., Simons F. J. Mapping Greenland 's mass loss in space and time // PNAS, 2012. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1206785109.
13. Levitus, S., et al. World ocean heat content and thermosteric sea level change (0 –2000 m), 1955– 2010 // Geophys. Res. Lett., 2012. 39 , L10603, doi:10.1029/2012GL051106.
14. Loeb N.G., et al. Advances in Understanding Top-of-Atmosphere Radiation Variability from Satellite Observations // Surv. Geophys., 2012. DOI 10.1007/s10712-012-9175-1.
15. Loeb N.G., et al. Observed changes in top-of-the-atmosphere radiation and upper-ocean heating consistent within uncertainty // Nature Geoscience, 2012. 5. P. 110–113.
16. Wolter K., Timlin M.S., El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext) // Intl. J. Climatology, 2011. 31. P. 1074–1087.

## **Energy aspects of the Earth's climate change: A View from Space**

**V.A. Golovko**

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

The Earth radiation budget (ERB) at the top of the atmosphere (TOA) is a key parameter which evaluates 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 estimations of increasing ocean heat content over the past 30 years. Implications include the expectation of additional global warming without further significant 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.

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