

УДК 551.510

## Предотвращение изменений климата за счет эмиссии сульфатов в стратосферу: влияние на глобальный углеродный цикл и наземную биосферу

А.В. Елисеев\*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы  
им. А.М. Обухова Российской академии наук  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 15.02.2012 г.

С использованием климатической модели Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН выполнена оценка влияния геоинженерии на характеристики климата и углеродного цикла. Геоинженерное воздействие в модели реализуется в период 2020–2070 гг. с целью компенсации потепления, возникающего при агрессивном сценарии антропогенного воздействия RCP 8.5. При однородном распределении стратосферных сульфатов по горизонтали и полной компенсации глобально осредненного антропогенного потепления, развивающегося в XXI в. при этом сценарии, происходит уменьшение количества осадков, сопровождающееся региональными аномалиями температуры. Влияние геоинженерного воздействия на приток солнечной радиации к поверхности Земли и долю диффузной радиации в этом притоке существенно зависит от сезона. Геоинженерия приводит к уменьшению полной первичной продукции растений и запаса углерода в наземной растительности, особенно в таежных регионах Сибири. Глобальная полная первичная продукция при этом в 2060–2070 гг. по сравнению с расчетом без геоинженерного воздействия уменьшается на  $17 \text{ ПгС} \cdot \text{г}^{-1}$ , а глобальный запас углерода в наземной растительности — на  $33 \text{ ПгС}$ . С другой стороны, геоинженерная компенсация потепления приводит к тому, что в XXI в. почва не теряет, а накапливает углерод. Максимальное различие его запаса в почве между указанными расчетами равно  $97 \text{ ПгС}$ . Таким образом, геоинженерия замедляет накопление  $\text{CO}_2$  в атмосфере при антропогенных эмиссиях на  $52 \text{ млн}^{-1}$  в последние годы XXI в. Однако это не оказывает значимого влияния на климатическую эффективность геоинженерии.

**Ключевые слова:** геоинженерия, стратосферный аэрозоль, углеродный цикл, климат, КМ ИФА РАН; geoengineering, stratospheric aerosols, carbon cycle, climate, IAP RAS CM.

### Введение

Глобальное потепление климата, наблюдавшееся в последние десятилетия XX в. и в первое десятилетие XXI в., связывается прежде всего с антропогенным воздействием на земную климатическую систему в основном из-за эмиссии парниковых газов [1]. Еще более интенсивное антропогенное воздействие на климат ожидается в XXI в. Оно может привести к климатическим изменениям, существенно превышающим наблюдавшиеся в XIX–XX вв. [1, 2]. Это привело к рассмотрению возможности контролируемого компенсирующего воздействия на климат с целью смягчения его изменений. Так, М.И. Будыко [3], основываясь на общем похолодании климата после крупных вулканических извержений, предложил распылять сернистые аэрозоли (подобные вулканическим) в стратосфере с целью предотвращения глобального потепления. В последние несколько лет интерес к подобному контролируемому компенсирующему воздействию заметно возрос, получив название геоинжене-

рии (иногда также используется термин «геоинжиниринг») [4–7].

Такое контролируемое воздействие на климат, однако, допустимо только в случае, если его возможные побочные эффекты хорошо изучены и либо признаны незначимыми для земной климатической системы, либо могут быть скомпенсированы, в свою очередь, специально разработанными мерами. Одним из таких негативных побочных эффектов является возможность резкого развития засушливых условий над континентами, подобных наблюдаемым после вулканических извержений [8, 9].

Вторым потенциально опасным эффектом является резкое ускорение потепления после прекращения компенсирующих сульфатных эмиссий [8, 10–15]. Кроме того, эмиссии сульфатов в стратосферу способны интенсифицировать активацию соединений хлора в стратосфере с деградацией озонового слоя и над Антарктикой, и над Арктикой [1, 16].

С другой стороны, высказывалось мнение о положительном побочном эффекте геоинженерии, связанном с тем, что рост содержания аэрозолей в стратосфере, наблюдаемый после вулканических извержений, приводит к увеличению доли диффузного

\* Алексей Викторович Елисеев (eliseev@ifaran.ru).

излучения в полном потоке фотосинтетически активной радиации (ФАР), приходящей к поверхности Земли. По сравнению с прямыми солнечными лучами диффузная радиация способна проникать в глубь кроны древесной растительности, интенсифицируя фотосинтез затененных листьев. Как следствие, накопление сульфатов в стратосфере может приводить к росту продуктивности наземной растительности [17].

Это предположение согласуется с измерениями в лиственном лесу [18] и расчетами, проведенными с численными климатическими моделями [19, 20] (в которых было явно задано влияние доли диффузной радиации в полном потоке солнечного излучения, приходящего к поверхности с использованием результатов [18]), но противоречит результатам анализа глобальной базы данных годовых колец деревьев [21].

Ранее с использованием климатической модели (КМ) ИФА РАН было получено, что измерения [18] могут быть воспроизведены без учета различий между прямой и диффузной коротковолновой радиацией и связаны с приближением климата к оптимальному для лиственных лесов умеренного пояса в регионах распространения последних [22, 23]. Как следствие, известные данные о перестройке наземного углеродного цикла после вулканических извержений удаётся, по крайней мере качественно, объяснить без привлечения механизмов влияния диффузной радиации на продуктивность растений. Это согласуется также с результатами, полученными с моделью экосистем CASA [24]. В таком случае реализация указанного метода геоинженерии может привести не к росту продуктивности растений (в частности, урожайности сельскохозяйственных культур), а к ее уменьшению. Дополнительно следует также отметить, что в [18] использовались лишь измерения для безоблачных условий, что могло привести к систематической ошибке. В частности, согласно результатам измерений [25, 26], проведенных в том же лесу, что и измерения [18], чистая продуктивность растений этого леса в 1992 г. была не максимальной, а минимальной за период 1992–2000 гг.

Целью настоящей работы является оценка влияния геоинженерии на характеристики глобального углеродного цикла. При этом используется климатическая модель, разработанная в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) [2, 22, 23, 27]. Результаты данной работы были представлены на заседании XVIII Рабочей группы «Аэрозоли Сибири» (г. Томск).

## Модель и численные эксперименты

В работе использовалась версия КМ ИФА РАН, включающая в себя пространственно распределенную схему наземного углеродного цикла, подробно описанную в [22, 23, 27]. В качестве схемы углеродного цикла океана в КМ ИФА РАН в настоящее время используется глобально осредненная модель, основанная на модели Бакастоу, но учитывающая зависимость констант химических реакций морского углеродного цикла от температуры (см. [28]). Угле-

родный цикл модели замыкается уравнением баланса массы углерода в атмосфере в приближении хорошо перемешанного газа для  $\text{CO}_2$  и в пренебрежении вкладом других углеродсодержащих веществ в этот баланс.

По сравнению с [22, 23, 27] наземный углеродный цикл КМ ИФА РАН был расширен учетом влияния диффузной солнечной радиации на продуктивность наземных экосистем. В частности, согласно [17] интенсивность фотосинтеза на единицу площади для древесных функциональных типов растительности вычисляется согласно

$$f_{\text{GPP}} = f_{\text{GPP},0}(1,0 + 1,1\eta - 1,8\eta^2) = f_{\text{GPP},0}n(\eta),$$

где  $\eta$  — доля диффузной радиации в полном потоке фотосинтетически активной радиации;  $f_{\text{GPP},0}$  — интенсивность фотосинтеза при  $\eta = 0$ , зависящая только от температуры приземного воздуха, влагосодержания верхнего слоя почвы и полного потока ФАР. Для травяных и сельскохозяйственных типов растительности эффект глубины проникновения диффузной радиации в листву не учитывается и  $f_{\text{GPP}} = f_{\text{GPP},0}$ . Функция  $n(\eta)$  возрастает с ростом  $\eta$  при  $\eta < \eta_0 = 0,306$ , достигает максимума  $n_{\text{max}} = 1,17$  при  $\eta = \eta_0$  и затем уменьшается до 0,3 при  $\eta = 1$ . Таким образом, при заданном потоке приходящей ФАР оптимальной для фотосинтеза оказывается доля диффузной радиации, равная  $\eta_0$ .

Подобно [12–14], оптическая толщина стратосферных рассеивающих аэрозолей  $T_{a,st}$  в модели линейно зависит от их массы в столбе атмосферы единичной площади  $m_{a,st}$ :

$$T_{a,st} = k_{e,a,st}m_{a,st},$$

с коэффициентом экстинкции  $k_{e,a,st} = 7,6 \text{ м}^2/\text{гС}$ . Радиационное возмущающее воздействие на верхней границе атмосферы  $R_{a,st,\text{TOA}}$  (называемое также мгновенным радиационным форсингом) в модели рассчитывается согласно

$$R_{a,st,\text{TOA}} = -a_{a,st}T_{a,st},$$

где  $a_{a,st} = 22 \text{ Вт/м}^2$ . В связи с тем что такая формулировка не выделяет прямую и рассеянную составляющие коротковолновой радиации, для оценки  $\eta$  использовалась параметризация [17]:

$$\eta = 1,11 - 1,31I_{ac},$$

при дополнительном условии  $0 < \eta < 1$ . Здесь индекс чистоты атмосферы  $I_{ac}$  равен отношению нисходящих компонент коротковолновой радиации на поверхности и на верхней границе атмосферы.

С КМ ИФА РАН были проведены численные эксперименты RCP85base и RCP85geo. В первом из них для 1765–2005 гг. были заданы антропогенные воздействия на климат за счет парниковых газов, тропосферных и стратосферных вулканических сульфатных аэрозолей, изменения солнечной постоянной и изменения площади сельскохозяйственных угодий в соответствии с протоколом «Historical simulations» проекта сравнения климатических моделей CMIP5

(Coupled Model Intercomparison Project, phase 5; см. <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>). При этом для углекислого газа использовались годовые антропогенные эмиссии за счет сжигания ископаемого топлива, а для закиси азота и метана — среднегодовые концентрации в атмосфере.

Эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу из-за землепользования интерактивно рассчитывались углеродным циклом модели. В этом расчете масса стратосферного аэрозоля на единицу площади  $m_{a,st}$  равна соответствующей массе вулканических аэрозолей  $m_{a,st,vol}$ . Для XXI в. указанные антропогенные воздействия в эксперименте RCP85base были заданы в соответствии с агрессивным сценарием антропогенного воздействия RCP 8.5 проекта CMIP5 (более подробно см. <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>).

В ансамблевом численном эксперименте RCP85geo дополнительно к внешним воздействиям, заданным в расчете RCP85base, учитывалось компенсирующее воздействие за счет стратосферных сульфатов. В этих экспериментах общая масса сульфатов в стратосфере  $M_{a,st,geoeng}$  рассчитывалась согласно балансовому уравнению

$$dM_{a,st,geoeng}/dt = E_{a,st,geoeng} - M_{a,st,geoeng}/t_{a,st},$$

где  $t$  — время;  $E_{a,st,g}$  — глобальные антропогенные эмиссии стратосферных аэрозолей;  $t_{a,st}$  — время пребывания аэрозолей в стратосфере. Эти аэрозоли считались однородно распределенными по горизонтали с массой на единицу площади  $m_{a,st,geoeng} = M_{a,st,geoeng}/S_{Earth}$ , где  $S_{Earth}$  — площадь поверхности Земли. Такое распределение часто используется при оценке эффективности геоинженерного воздействия на климат (см., например, [11, 13]) и близко к получаемому при геоинженерных эмиссиях в тропиках в модели ИВМ РАН с детальной схемой химических преобразований и переноса аэрозоля [20]. Полная масса аэрозоля в стратосфере на единицу площади  $m_{a,st} = m_{a,st,vol} + m_{a,st,geoeng}$ .

Контролируемые эмиссии стратосферных аэрозолей для периода 2020–2070 гг. были заданы пропорциональными мгновенному глобальному радиационному возмущающему воздействию на верхней границе атмосферы  $R_{GHG+tropSA}$  за счет парниковых газов (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O) и тропосферных сульфатов относительно доиндустриального состояния:

$$E_{a,st,g} = k_E R_{GHG+tropSA}.$$

Для разных реализаций внутри ансамбля RCP85geo коэффициент интенсивности эмиссий  $k_E$  менялся от 0,2 до 1,3 (TrS/год)/(Вт/м<sup>2</sup>), будучи постоянным во времени. Кроме того, различные реализации внутри этого ансамбля расчетов различались между собой временем жизни антропогенных сульфатов в стратосфере  $t_{a,st}$  в интервале 2–3 года [5, 29]. Начальным условием для всех реализаций численного эксперимента RCP85geo служило состояние модели, достигнутое в январе 2020 г. расчета RCP85base.

После проведения ансамблевых расчетов RCP85geo была проведена линейная интерполяция решений по параметру  $k_E$ . Из полученных результатов были вы-

браны те, для которых глобальная температура не меняется в 2020–2070 гг. относительно средней за 2000–2010 гг. В случае, если для данного года такая компенсация невозможна (это отмечалось в модели вплоть до начала 2030-х гг.), то для последующего анализа выбирался расчет с максимальным  $k_E$ . После 2070 г. параметры интерполяции между различными значениями  $k_E$  уже не менялись, а фиксировались на значениях, соответствующих 2070 г.

## Результаты расчетов

### Изменение характеристик климата и углеродного цикла в XXI в. в расчете без геоинженерии

При сценарии антропогенного воздействия RCP 8.5 концентрация углекислого газа в КМ ИФА РАН в XXI в. монотонно возрастает до 934 млн<sup>-1</sup> в 2100 г. (рис. 1, а).

При этом наблюдается рост глобальной приповерхностной температуры атмосферы  $T_g$  на 3,7 К (рис. 1, б) и осадков на 21%. Потепление особенно заметно над сушей средних и высоких широт, особенно в Евразии, где зимой увеличение приземной температуры равно 8–11, а летом 4–7 К. Рост осадков отмечается в регионах шторм-треков и в регионе влияния восточно-азиатского муссона.

Уменьшение содержания антропогенных аэрозолей в тропосфере в XXI в. приводит к общему увеличению поглощения солнечной радиации поверхностью  $R_{sw}$ , особенно заметному над сушей Северного полушария, где оно в среднем за год в XXI в. увеличивается на 2–5 Вт/м<sup>2</sup>. В средних и субполярных широтах это увеличение обусловлено ростом  $R_{sw}$  в теплый период из-за соответствующего сезонного хода инсоляции на верхней границе атмосферы. В субтропиках, наоборот, это увеличение проявляется в холодный период года и связано с ростом содержания водяного пара в атмосфере при изменении температуры, обуславливающей влагоемкость атмосферы и испарение с поверхности. Рост содержания водяного пара и количества облаков в атмосфере при общем потеплении приводит также к увеличению доли рассеянной радиации  $\eta$ . Последнее отмечается в большинстве регионов, за исключением Европы, юго-востока и центра Северной Америки, где уменьшение  $\eta$  связано с уменьшением содержания аэрозолей в тропосфере в XXI в. Влагосодержание почвы, влияющее на продукцию наземных экосистем в КМ ИФА РАН, в модели мало меняется в XXI в. [23].

Полная ( $f_{GPP}$ ) и чистая первичная продукция наземных экосистем на единицу площади увеличивается во всех регионах в XXI в. [22, 23, 27]. Глобальная чистая первичная продукция  $F_{GPP}$  в XXI в. возрастает со 120 до 170 ПгС · г<sup>-1</sup> (рис. 1, в). Как следствие, запас углерода на единицу площади в наземных экосистемах  $c_b$  увеличивается во всех регионах, за исключением тех, где происходит дефорестация. Увеличение  $c_b$  особенно велико в регионах тропических лесов (на 8–10 кгС · м<sup>-2</sup>) и умеренных