

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 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 ПгС . Таким образом, геоинженерия замедляет накопление CO_2 в атмосфере при антропогенных эмиссиях на 52 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 эмиссий 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 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 η — 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 η 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 η_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 $k_{e,a,st} = 7,6 \text{ м}^2/\text{гS}$. 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 $a_{a,st} = 22 \text{ Вт}/\text{м}^2$. В связи с тем что такая формулировка не выделяет прямую и рассеянную составляющие коротковолновой радиации, для оценки η 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_2 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_2 , CH_4 и N_2O) 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/м²), 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, достигаемое 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⁻¹ в 2100 г. (рис. 1, *a*).

При этом наблюдается рост глобальной приповерхностной температуры атмосферы T_g на 3,7 К (рис. 1, *b*) 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/м². 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 влажностью атмосферы и испарение с поверхности. Рост содержания водяного пара и количества облаков в атмосфере при общем потеплении приводит также к увеличению доли рассеянной радиации η . Последнее отмечается в большинстве регионов, за исключением Европы, юго-востока и центра Северной Америки, где уменьшение η 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⁻¹ (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⁻²) и умеренных

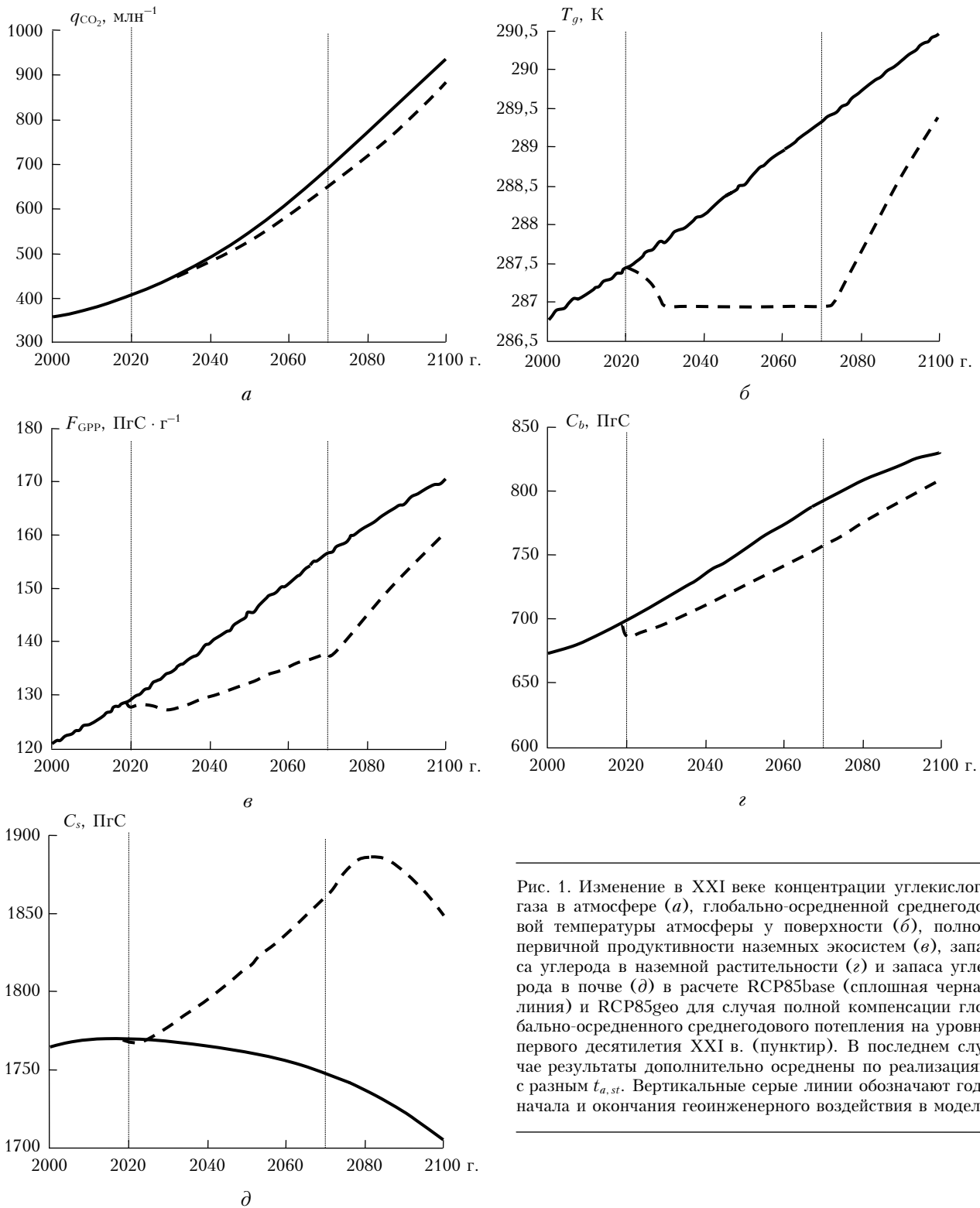


Рис. 1. Изменение в XXI веке концентрации углекислого газа в атмосфере (*a*), глобально-средней среднегодовой температуры атмосферы у поверхности (*б*), полной первичной продуктивности наземных экосистем (*в*), запаса углерода в наземной растительности (*г*) и запаса углерода в почве (*д*) в расчете RCP85base (сплошная черная линия) и RCP85geo для случая полной компенсации глобально-среднего среднегодового потепления на уровне первого десятилетия XXI в. (пунктир). В последнем случае результаты дополнены средними по реализациям с разным $t_{a, st}$. Вертикальные серые линии обозначают года начала и окончания геоинженерного воздействия в модели

широколиственных лесов (на $6-8 \text{ кгС} \cdot \text{м}^{-2}$). Глобальный запас углерода в наземной растительности C_b в XXI в. увеличивается на 158 PgC (рис. 1, *г*). Запас углерода в почве на единицу площади c_s растет в большей части Европы, на севере Центральной Сибири, на северо-востоке Евразии, северо-западе Се-

верной Америки, на севере Индостана и в регионах распространения тропических лесов в Амазонии и долине р. Конго. Характерные значения этого увеличения равны от 2 до $5 \text{ кгС} \cdot \text{м}^{-2}$. При этом отмечается уменьшение c_s на такие же величины в обширных регионах Центральной Евразии и Северной Америки.

Последнее доминирует в изменении глобального запаса углерода в почве C_s , который в XXI в. уменьшается на 64 ПгС (рис. 1, *д*).

Отклик характеристик климата и углеродного цикла на вулканические извержения

В годы непосредственно после вулканических извержений в модели отмечается уменьшение приземной температуры атмосферы и осадков. В среднем за год похолодание наиболее заметно над сушей средних широт, особенно в Северном полушарии. Уменьшение осадков оказывается наиболее заметным в субтропических регионах. После извержения влк. Пинатубо (1991 г.) уменьшение T_g составило 0,24 К.

Несмотря на увеличение доли диффузной радиации η , F_{GPP} в 1991 г. уменьшился относительно 1990 г. на 0,8 ПгС · г⁻¹, а в 1992 г. еще на 0,9 ПгС · г⁻¹. При этом приближение климатических условий к оптимальным привело к увеличению f_{GPP} в регионах распространения внутропических широколиственных лесов, что согласуется с результатами измерений [18]. Уменьшение F_{GPP} частично компенсируется уменьшением гетеротрофного дыхания, значение которого за два указанных года становится меньше на 0,9 ГтС · г⁻¹. Этот результат согласуется с результатами [30], но не согласуется с оценкой [19] (см. введение).

Влияние геоинженерии на изменение характеристик климата и углеродного цикла в XXI в.

Подобно [13, 14], достаточно интенсивные геоинженерные эмиссии сульфатов позволяют стабилизировать температуру (см. рис. 1, *б*). При этом в ряде регионов (преимущественно над континентами средних широт) возникают аномалии приземной температуры ΔT (здесь Δ означает изменение соответствующей переменной с 2000–2010 по 2060–2070 гг.), по абсолютной величине не превышающие 1,5 К. Летом в субполярных широтах над сушей и в субтропиках количество осадков уменьшается на 2–5 см/мес по сравнению с 2000–2010 гг. В средних широтах, наоборот, количество осадков увеличивается, особенно зимой.

Полная компенсация глобального потепления на уровне первого десятилетия XXI в. требует в середине этого столетия создания аэрозольного слоя в стратосфере с общей массой 6,2 ТгS (7,1 ТгS) в 2040–2050 гг. (2060–2070 гг.). Первая величина совпадает с разностью значений $M_{a,st.,geoeng}$ между периодами 2000–2010 и 2040–2050 гг., полученной в [31].

Как и ожидалось, геоинженерия уменьшает количество приходящей к поверхности солнечной радиации. Однако δR_{SW} (здесь и далее δ означает разность данной переменной Y между модельными экспериментами в один и тот же момент времени: $\delta Y = Y|_{RCP85geo} - Y|_{RCP85base}$) оказывается отрицательным только в зимний период, когда содержание влаги в атмосфере относительно мало. В теплый период года, несмотря на отражение солнечной радиации

стратосферным аэрозолем, геоинженерия, наоборот, увеличивает приток солнечной радиации к поверхности. В свою очередь, $\delta \eta$ положительна в среднем за год и в холодный период, но отрицательна в теплый. Причиной такого отклика в модели является уже упоминавшийся отклик содержания водяного пара и количества облаков в атмосфере на внешнее воздействие.

Геоинженерия приводит к уменьшению полной первичной продукции наземной растительности. Это проявляется в большинстве регионов с типичными значениями δf_{GPP} в 2060-х гг. от $-0,1$ до $-0,3$ кгС · м⁻² · г⁻¹ (рис. 2, *а*).

Глобальная полная первичная продукция при этом уменьшается на 17 ПгС · г⁻¹ (см. рис. 1, *в*). Следует специально отметить, что вклад различия δR_{SW} и $\delta \eta$ в δf_{GPP} мал. Различие отклика полной первичной продукции наземной растительности между расчетами RCP85base и RCP85geo связано с различием температуры и влагосодержания почвы между указанными расчетами.

Уменьшение первичной продукции растительности приводит к уменьшению запаса углерода в ней, проявляющемуся в большинстве регионов за исключением изолированных регионов Евразии и запада Центральной Африки (рис. 2, *б*). Типичные значения δC_b в 2060-х гг. равны 0,2–1 кгС · м⁻², а в таежных регионах Восточной Сибири достигают 5 кгС · м⁻². Уменьшение запаса углерода в наземной растительности из-за геоинженерии в этот период оказывается значимым на глобальном уровне, составляя 33 ПгС (см. рис. 1, *з*). С другой стороны, геоинженерная компенсация потепления приводит к тому, что в XXI в. почва не теряет углерод, а накапливает его. В 2060–2070 гг. δC_s во всех регионах положительно и в большинстве регионов равно от 0,5 до 3 кгС · м⁻² (рис. 2, *в*). Как следствие, в XXI в. глобальный запас углерода в почве при геоинженерном воздействии не уменьшается (см. выше), а возрастает на 97 ПгС (см. рис. 1, *д*). Из-за инерционности углеродного запаса почвы накопление углерода в ней происходит и после прекращения геоинженерного воздействия. Почва начинает выделять углекислый газ только в последние два десятилетия XXI в., когда прекращение контролируемого воздействия на климат в модели приводит к быстрому росту глобальной и региональной температуры атмосферы у поверхности (см. рис. 1, *б*). Подобный отклик запаса углерода в почве на рост содержания рассеивающих аэрозолей в стратосфере после вулканических извержений был получен в расчетах с моделью NCAR-CSM 1.4-carbon [32].

Такое накопление углерода почвой приводит к тому, что содержание углекислого газа в атмосфере q_{CO_2} в численном эксперименте RCP85geo в XXI в. оказывается меньше, чем в численном эксперименте RCP85base. В 2060–2070 гг. это различие достигнет 33 млн⁻¹, а в конце XXI в. — 52 млн⁻¹ (см. рис. 1, *а*). Последнее согласуется с положительно обратная связь между климатом и углеродным циклом в КМ ИФА РАН [23], характерной и для других современных климатических моделей с углеродным

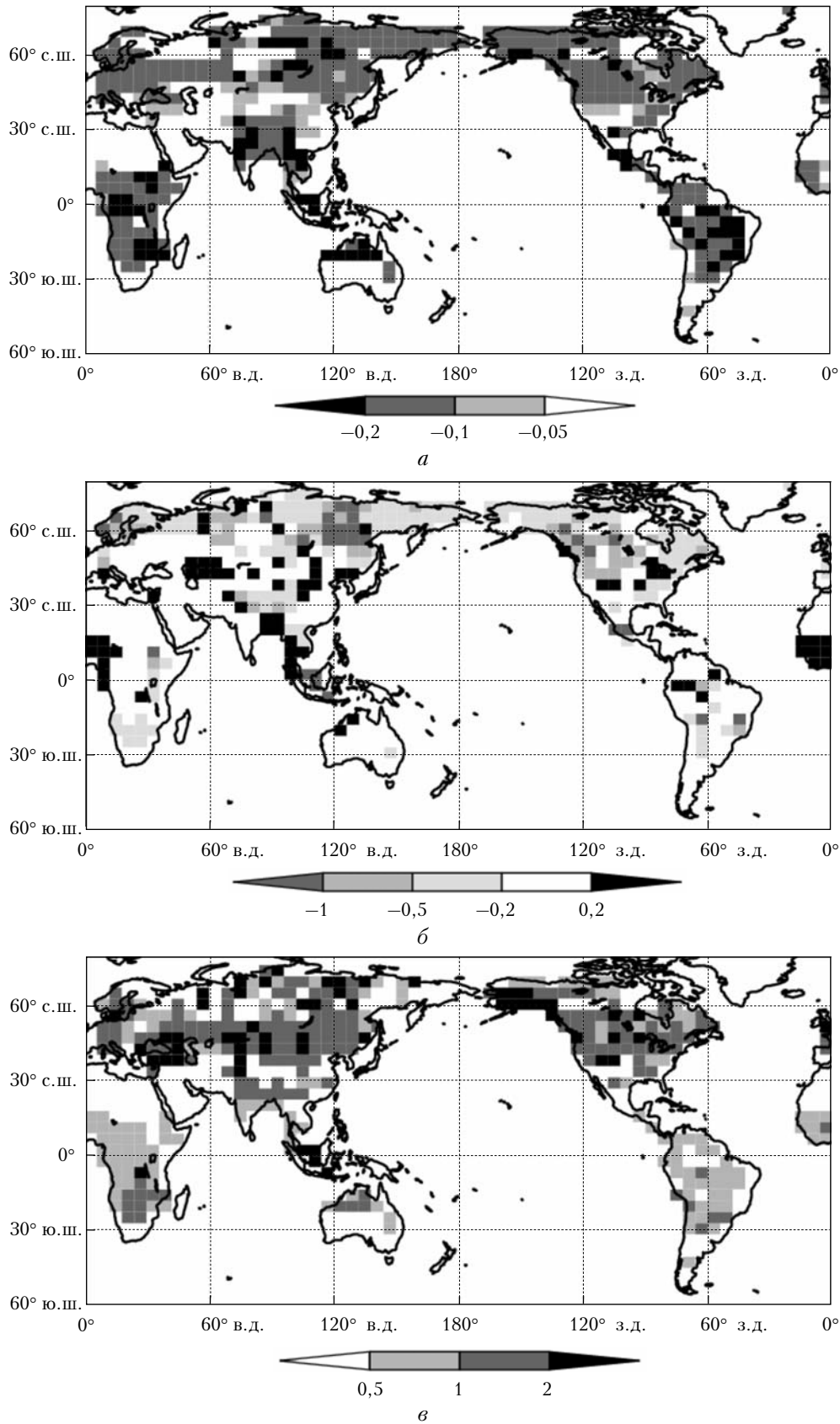


Рис. 2. Разность между экспериментами RCP85base и RCP85geo, осредненная по реализациям с разными $t_{a, st}$, в 2060–2070 гг. для полной продуктивности наземных экосистем ($\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$) (а), запаса углерода в наземной растительности ($\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$) (б) и запаса углерода в почве ($\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$) (в)

циклом [33]. Уменьшение содержания CO_2 в атмосфере после вулканических извержений (связанное, как и в КМ ИФА РАН, с откликом гетеротрофного дыхания на климатические изменения) было получено также в численных экспериментах с климатической моделью NCAR CSM 1.4-carbon [32]. Следует отметить, что уменьшение накопления CO_2 в атмосфере не оказывает значимого влияния на климатическую эффективность геоинженерии. Такое уменьшение q_{CO_2} приводит к уменьшению глобального радиационного возмущающего воздействия (РВВ) углекислого газа менее чем на 6% в XXI в. С учетом других антропогенных парниковых газов (метана и закиси азота) эффект ослабления парникового РВВ оказывается еще меньше.

Заключение

С использованием климатической модели промежуточной сложности Института физики атмосферы им. А.М. Обухова выполнена оценка влияния геоинженерии на характеристики глобального 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 полная компенсация глобально осредненного антропогенного потепления, развивающегося в XXI в. при этом сценарии, приводит к уменьшению количества осадков, особенно в субтропиках и в субполярных широтах. Пространственная неоднородность отклика температуры на внешнее воздействие приводит к тому, что компенсация среднеглобального потепления сопровождается региональными аномалиями температуры.

Влияние геоинженерного воздействия на приток солнечной радиации к поверхности Земли R_{SW} и долю диффузной радиации в этом притоке η существенно зависит от сезона. В среднем за год и в холодный период геоинженерия уменьшает R_{SW} и увеличивает η . В теплый период года, который наиболее важен для характеристик наземного углеродного цикла, контролируемое компенсирующее воздействие, наоборот, увеличивает R_{SW} и уменьшает η . Причиной такого отклика в модели является отклик содержания водяного пара и количества облаков в атмосфере на внешнее воздействие.

Однако механизмы влияния геоинженерии на характеристики наземного углеродного цикла связаны, в основном, не с изменением характеристик солнечной радиации на поверхности, а с соответствующей перестройкой температурно-влажностных условий в разных регионах. Геоинженерия приводит к уменьшению полной первичной продукции наземной растительности и запаса углерода в ней, 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 ПгС .

С другой стороны, геоинженерная компенсация потепления приводит к тому, что в XXI в. почва не теряет углерод, а накапливает его. К концу периода реализации геоинженерии в модели разность запаса углерода в почве между численными экспериментами с учетом геоинженерного воздействия и без его учета равна 97 ПгС . Таким образом, геоинженерия замедляет накопление CO_2 в атмосфере при антропогенных эмиссиях на 33 млн^{-1} в 2060–2070 гг. и на 52 млн^{-1} в последние годы XXI в. Однако уменьшение накопления CO_2 в атмосфере не оказывает значимого влияния на климатическую эффективность геоинженерии.

Автор выражает благодарность В.А. Бровкину и И.И. Мохову за полезные замечания, а А.Г. Рябошапко — за обращение внимания автора на проблему отклика продуктивности экосистем на геоинженерное воздействие.

Работа выполнена при поддержке программ РАН и Министерства образования и науки РФ, Российского фонда фундаментальных исследований и гранта Президента РФ НШ-3301.2010.5.

1. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* / S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. (eds.). Cambridge; N.Y.: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
2. Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Хон В.Ч., Акперов М.Г., Аржанов М.М., Карпенко А.А., Тухонов В.А., Чернокульский А.В. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // Докл. РАН. 2005. Т. 402, № 2. С. 243–247.
3. Будыко М.И. Изменение климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 280 с.
4. Schneider S.H. Earth systems engineering and management // Nature (Gr. Brit.). 2001. V. 409, N 6868. P. 417–421.
5. Израэль Ю.А. Эффективный путь сохранения климата на современном уровне — основная цель решения климатической проблемы // Метеорол. и гидрол. 2005. № 10. С. 5–9.
6. Crutzen P.J. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? // Clim. Change. 2006. V. 77, N 3–4. P. 211–219.
7. Wigley T.M.L. A combined mitigation/geoengineering approach to climate stabilization // Science. 2006. V. 314, N 5798. P. 452–454.
8. Robock A., Oman L., Stenchikov G.L. Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO_2 injections // J. Geophys. Res. D. 2008. V. 113, N 16. D16101.
9. Trenberth K.E., Dai A. Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34, N 15. L15702.
10. Matthews H.D., Caldeira K. Transient climate-carbon simulations of planetary geoengineering // Proc. Nat. Acad. Sci. 2007. V. 104, N 24. P. 9949–9954.
11. Brovkin V., Petoukhov V., Claussen M., Bauer E., Archer D., Jaeger C. Geoengineering climate by stratospheric sulfur injections: Earth system vulnerability to technological failure // Clim. Change. 2009. V. 92, N 3–4. P. 243–259.
12. Елисеев А.В., Мохов И.И. Модельные оценки эффективности ослабления и предотвращения глобального потепления климата в зависимости от сценариев контролируемых аэрозольных эмиссий в стратосферу // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2009. Т. 45, № 2. С. 232–244.

13. *Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А.* Предотвращение глобального потепления с помощью контролируемых эмиссий аэрозолей в стратосферу: глобальные и региональные особенности отклика температуры по расчетам с КМ ИФА РАН // *Оптика атмосфер. и океана*. 2009. Т. 22, № 6. С. 521–526.
14. *Eliseev A.V., Chernokulsky A.V., Karpenko A.A., Mokhov I.I.* Global warming mitigation by sulphur loading in the stratosphere: Dependence of required emissions on allowable residual warming rate // *Theor. Appl. Climatol.* 2010. V. 101, N 1–2. P. 67–81.
15. *Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Аналитические оценки эффективности предотвращения потепления климата контролирующими аэрозольными эмиссиями в стратосферу // *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 5. С. 16–26.
16. *Tilmes S., Muller R., Salawitch R.* The sensitivity of polar ozone depletion to proposed geoengineering schemes // *Science*. 2008. V. 320, N 5880. P. 1201–1204.
17. *Roderick M.L., Farquhar G.D., Berry S.L., Noble I.R.* On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation // *Oecologia*. 2001. V. 129, N 1. P. 21–30.
18. *Gu L., Baldocchi D.D., Wofsy S.C., Munger J.W., Michalsky J.J., Urbanski S.P., Boden T.A.* Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: Enhanced photosynthesis // *Science*. 2003. V. 299, N 5615. P. 2035–2038.
19. *Mercado L.M., Bellouin N., Sitch S., Boucher O., Huntingford C., Wild M., Cox P.M.* Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink // *Nature (Gr. Brit.)*. 2009. V. 457, N 7241. P. 1014–1017.
20. *Володин Е.М., Кострыкин С.В., Рябошапка А.Г.* Моделирование изменения климата вследствие введения серосодержащих веществ в стратосферу // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 2011. V. 47, № 4. P. 467–476.
21. *Krakauer N.Y., Randerson J.T.* Do volcanic eruptions enhance or diminish net primary production? Evidence from tree rings // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 2003. V. 17, N 4. 1118.
22. *Eliseev A.V., Mokhov I.I.* Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios // *Adv. Atmos. Sci.* 2011. V. 28, N 5. P. 1215–1232.
23. *Елисеев А.В.* Изменение климата и характеристик наземных экосистем при наличии антропогенного и естественного воздействия: Дис. ... д.ф.-м.н. М.: Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 2010. 331 с.
24. *Angert A., Biraud S., Bonfils C., Fung I.* CO₂ seasonality indicates origins of post-Pinatubo sink // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, N 11. L11103.
25. *Barford C.C., Wofsy S.C., Goulden M.L., Munger J.W., Pyle E.H., Urbanski S.P., Hutryra L., Saleska S.R., Fitzjarrald D., Moore K.* Factors controlling long- and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a mid-latitude forest // *Science*. 2001. V. 294, N 5547. P. 1688–1691.
26. *Law B.E., Falge E., Gu L., Baldocchi D.D., Bakwin P., Berbigier P., Davis K., Dolman A.J., Falk M., Fuentes J.D., Goldstein A., Granier A., Grelle A., Hollinger D., Janssens I.A., Jarvis P., Jensen N.O., Katul G., Mahli Y., Matteucci G., Meyers T., Monson R., Munger W., Oechel W., Olson R., Pilegaard K., Paw U.K.T., Thorgeirsson H., Valentini R., Verma S., Vesala T., Wilson K., Wofsy S.* Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation // *Agric. Forest. Meteorol.* 2001. V. 113, N 1–4. P. 97–120.
27. *Елисеев А.В.* Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI в. с учетом неопределенности значений параметров наземной биоты // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 2011. Т. 47, № 2. С. 147–170.
28. *Mokhov I.I., Eliseev A.V., Karpenko A.A.* Decadal-to-centennial scale climate-carbon cycle interactions from global climate models simulations forced by anthropogenic emissions // *Climate Change Research Trends / Ed. L.N. Peretz. N.Y., Hauppauge: Nova Sci. Publ., 2008. P. 217–241.*
29. *Rasch P.J., Crutzen P.J., Coleman D.B.* Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols: The role of particle size // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35, N 2. L02809.
30. *Brovkin V., Lorenz S.J., Jungclaus J., Raddatz T., Timmreck C., Reick C.H., Segschneider J., Six K.* Sensitivity of a coupled climate-carbon cycle model to large volcanic eruptions during the last millennium // *Tellus*. B. 2010. V. 62, N 5. P. 674–681.
31. *Фролькис В.А., Кароль И.Л.* Моделирование влияния параметров стратосферного аэрозольного экрана на эффективность компенсации парникового потепления глобального климата // *Оптика атмосфер. и океана*. 2010. V. 23, № 8. P. 710–722.
32. *Frölicher T.L., Joos F., Raible C.C.* Sensitivity of atmospheric CO₂ and climate to explosive volcanic eruptions // *Biogeosciences*. 2011. V. 8, N 8. P. 2317–2339.
33. *Friedlingstein P., Cox P., Betts R., Bopp L., von Bloh W., Brovkin V., Cadule P., Doney S., Eby M., Fung I., Bala G., John J., Jones C., Joos F., Kato T., Kawamiya M., Knorr W., Lindsay K., Matthews H.D., Raddatz T., Rayner P., Reick C., Roeckner E., Schnitzler K.-G., Schnur R., Strassmann K., Weaver A.J., Yoshikawa C., Zeng N.* Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C⁴MIP model intercomparison // *J. Climate*. 2006. V. 19, N 12. P. 3337–3353.

A.V. Eliseev. Climate mitigation via sulphate emission in the stratosphere: impact on global carbon cycle and terrestrial biosphere.

Based on the IAP RAS climate model (CM), an estimation of geoengineering impact on characteristics of climate and carbon cycle is performed. In the model, geoengineering is applied for 2020–2070 to mitigate climate warming developing under aggressive anthropogenic scenario RCP 8.5. Assuming that horizontal distribution of stratospheric sulphates is homogeneous, complete mitigation of this warming suppresses precipitation and is accompanied by regional anomalies of temperature. Geoengineering impact on budget of short-wave radiation at the surface and fraction of diffuse radiation in this budget depends strongly on season. Geoengineering mitigation suppresses gross primary production of terrestrial vegetation and respective carbon stock, especially in Siberian boreal forest. In this, total terrestrial gross primary production during 2060–2070 is diminished by 17 PgC · yr⁻¹ and total carbon stock in terrestrial vegetation is reduced by 33 PgC. At the same time, mitigation of globally averaged warming leads to increased rather than to depleted soil carbon stock in the 21st century. Differences in total soil carbon stock between the simulations with and without geoengineering may be as large as 97 PgC during this century. This leads to the slow-down of CO₂ build up in the atmosphere. This slow-down amounts 52 ppmv in the end of the 21st century. However, the latter does not affect markedly climatic efficiency of geoengineering.