

## ПЕРСПЕКТИВЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ГЛОБАЛЬНОЙ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ НА ПРИЕМЛЕМОМ УРОВНЕ

*А.Г. Рябошапка*<sup>1)</sup>, *В.А. Гинзбург*<sup>1,2)\*</sup>, *А.П. Ревокатова*<sup>1,2,3)</sup>

<sup>1)</sup> Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,  
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б; \**veronika.ginzburg@gmail.com*

<sup>2)</sup> Институт географии РАН,  
Россия, 119017, Москва, Старомонетный переулок, д. 29

<sup>3)</sup> ФГБУ Гидрометцентр России,  
Россия, 123242, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.11-13

**Резюме.** В работе рассмотрены три подхода к стабилизации глобальной приземной температуры на приемлемом уровне. Это сокращение антропогенных выбросов парниковых газов, удаление из атмосферы накопленного избытка CO<sub>2</sub> и компенсация парникового эффекта путем снижения потока приходящей солнечной радиации. Показаны достоинства и недостатки каждого из методов. Обобщены результаты в области разработки методов, позволяющих не допустить превышения глобальной температурой порогового значения. В сложившейся обстановке, учитывая с высокую неопределенность климатических прогнозов, и продолжающийся интенсивный рост глобальной атмосферной концентрации CO<sub>2</sub>, целесообразно быть готовым к применению всех трех подходов к решению климатической проблемы.

**Ключевые слова.** Изменение климата, глобальная температура, сокращение выбросов, методы «негативной эмиссии», методы управления солнечной радиацией.

## PROSPECTS OF STABILIZATION OF THE GLOBAL SURFACE ATMOSPHERIC TEMPERATURE AT AN ACCEPTABLE LEVEL

*A.G. Ryaboshapko*<sup>1)</sup>, *V.A. Ginzburg*<sup>1,2)\*</sup>, *A.P. Revokatova*<sup>1,2,3)</sup>

<sup>1)</sup> Institute of global climate and ecology,  
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russia; \**veronika.ginzburg@gmail.com*

<sup>2)</sup> Institute of geography RAS,  
29, Staromonetnyi per., 119017, Moscow, Russia

<sup>3)</sup> Hydrometeorological centre of Russia,  
11-13, B. Predtechensky per., 123242, Moscow, Russia

**Summary.** Three approaches to stabilization of the global surface temperature at an acceptable level are considered in the paper. They are reduction of anthropogenic GHG emissions, “negative emission” methods and compensating for the greenhouse effect by reduction of incoming solar radiation flux. Advantages and disadvantages of each method are shown. The current achievements in the field

of the development of those methods allowing to prevent the exceedance of thresholds by the global temperature are summarized. In the current situation, taking into account the high uncertainty of climate projections and continuing intensive growth of global atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, it is expedient to be ready to apply all three approaches to the solution of the climate problem.

**Keywords.** Climate change, global temperature, emission reduction, negative emission methodology, solar radiation management.

## Введение

Перед человечеством стоят две важнейшие проблемы глобального уровня: как накормить постоянно растущее население Земли и как избежать климатического кризиса (Smith et al., 2013). Эти две проблемы неразрывно связаны между собой. Борьба с выбросами парниковых газов предполагает опережающее развитие биоэнергетики, которая требует земельных площадей для производства биотоплива. Это в свою очередь сокращает площади, пригодные для производства продуктов питания. Растущее население (в основном в развивающихся странах) стремится достичь уровня жизни развитых стран, что невозможно без использования относительно дешевого и пока легкодоступного ископаемого топлива. Важным фактором становится социальный эгоизм отдельных групп населения, крупных международных корпораций и даже целых стран. Ярким примером может служить намерение руководства США выйти из Парижского соглашения.

В преддверии Конференции ООН по изменению климата (COP 15) в 2009 году в Копенгагене эксперты Европейского Союза (EU CCEG, 2008) разработали концепцию предельно допустимого уровня превышения средней глобальной преиндустриальной температуры атмосферы на 2 градуса Цельсия. На Конференции в Париже в 2015 году (COP 21) была предложена еще более амбициозная цель: «удержания прироста средней температуры намного ниже 2°C сверх доиндустриального уровня и продолжения усилий по ограничению роста температуры до 1.5°C». Это намерение было подтверждено участниками следующей Конференции в 2016 году в Марракеше (COP 22).

В настоящее время общепризнано, что основной причиной роста глобальной температуры является увеличение содержания в атмосфере парниковых газов, в первую очередь CO<sub>2</sub>. С начала индустриальной революции среднегодовая концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере выросла с 277 ppm(v) в начале XVIII века до 406 ppm(v) к 2016 году по данным обсерватории ВМО «Мауна Лоа».

Последние годы отмечается, что не только продолжается рост концентрации, но и отмечается увеличение скорости роста глобального содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере. По данным 5-го Оценочного доклада МГЭИК (МГЭИК, 2014) содержание CO<sub>2</sub> в атмосфере увеличивалось ежегодно в среднем на 2.0±0.1 ppm(v) в течение 2002-2011 гг. В это десятилетие темпы роста были выше, чем во все предыдущие десятилетия с начала прямых измерений концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере в 1958 году. По данным NOAA (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/>) годовая скорость роста содержания CO<sub>2</sub> за 10

лет с 2000-2009 год составляла 1.9 ppm(v), за последние 10 лет (с 2007 года) – 2.2 ppm(v), за последние 5 лет – 2.6 ppm(v), а за последние 2 года – 3.0 ppm(v). В последние годы концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере растет быстрее, чем прогнозировала Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) в условиях наиболее пессимистического прогнозного сценария (траектории) RCP8.5 (Representative Concentration Pathways – репрезентативная траектория изменения концентрации) (Riahi et al., 2007). Прогнозируемое содержание диоксида углерода по этому сценарию в атмосфере в 2016 составило 404 ppm(v), что ниже реально наблюдаемого уровня 406 ppm(v).

Принципиальная возможность человечества влиять на климат Земли была впервые рассмотрена и научно обоснована в классических работах целого ряда ученых, например, Г. Колиндера (Callendar, 1938) и М.И. Будыко (1974а). До последнего времени эксперты Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) с большой осторожностью подходили к использованию возможностей целенаправленного изменения параметров климатической системы Земли (геоинженеринга или инженерии климата). Однако, в последнее время растет осознание того факта, что только методами сокращения выбросов парниковых газов в ближайшие десятилетия не получится достигнуть стабилизации концентрации парниковых газов на допустимом уровне. В пятом оценочном докладе МГЭИК (Clarke et.al, 2014) допускается, что некоторые методы геоинженеринга, такие как улавливание и захоронение углерода при сжигании биотоплива, могут рассматриваться в качестве дополнения к традиционным методам сокращения выбросов. В докладе так же отмечается, что другие методы геоинженеринга требуют дополнительного исследования.

Прежде всего, необходимо понимание того, за счет чего может быть достигнута поставленная цель стабилизации глобальной температуры на приемлемом уровне?

### **Подходы к решению климатической проблемы**

В настоящее время рассматриваются три основных подхода к стабилизации глобальной приземной температуры на приемлемом уровне: (1) сокращение антропогенных выбросов CO<sub>2</sub>, (2) удаление из атмосферы накопленного избытка CO<sub>2</sub> и (3) компенсация парникового эффекта путем снижения потока приходящей солнечной радиации.

#### ***1. Сокращение выбросов CO<sub>2</sub> и переход на безуглеродную энергетику – перспективы реализации***

До настоящего времени все попытки взять ситуацию под контроль путем согласованного на политическом уровне сокращения выбросов парниковых газов (первый подход) не увенчались успехом. Несмотря на призывы общественных организаций и заверения политиков, продолжающийся рост глобальной концентрации CO<sub>2</sub> в последнее десятилетие не оставляет сомнений в неэффективности усилий, предусмотренных Киотским протоколом. Глобаль-

---

ная эмиссия  $\text{CO}_2$  от сжигания ископаемого топлива и производства цемента вместо ожидаемого сокращения продолжает увеличиваться: за 10-летие с 2005 по 2015 гг. она возросла более, чем на 17% (PBL Netherlands Environment Assessment Agency, 2016). По данным Международного энергетического агентства (МЭА) в последнее десятилетие основной вклад в увеличение выбросов углекислого газа вносят страны, не включенные в Приложение 1 к Рамочной конвенции по изменению климата, т.е. не имеющие обязательств по ограничению выбросов парниковых газов (IEA, 2016).

Первый подход к решению проблемы стабилизации климата представляется наиболее естественным – сократить антропогенные выбросы  $\text{CO}_2$  до такого уровня, при котором дальнейший рост концентрации в атмосфере прекратится и, соответственно, прекратится рост глобальной приземной температуры. Однако многие авторитетные эксперты выражают озабоченность тем, что даже при сокращении выбросов практически до нуля цель вернуться к исходной концентрации  $\text{CO}_2$  уже недостижима, по меньшей мере в ближайшие столетия.

По другим оценкам средняя продолжительность отклика климатической системы на выбросы парниковых газов составляет 10 лет (Ricke, Caldeira, 2014), т.е. максимальное потепление наступает через 10 лет после достижения максимальной величины выбросов. Модельные расчеты основанных на разовой значимой пульсации объема выбросов  $\text{CO}_2$  (CMIP5) показывают, что выбросы, произошедшие в прошлом могут повлиять на изменение температуры в ближайшие после этого годы, но уже после этого их влияние на климат будет минимальным, а изменение глобальной температуры воздуха будет зависеть от уровня выбросов в последующие годы.

Основываясь на этой теории, разработаны глобальные обобщенные социально-экономические сценарии (траектории) развития (Shared Socioeconomic Pathways – SSP), которые необходимо реализовать для достижения цели стабилизации глобальной температуры к концу XXI века на уровне, не превышающем пороговых значений. В отличие от принятых ранее траекторий RCP, основанных на прогнозировании уровней концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, новое семейство траекторий SSP описывает пути развития, включая социально-экономические аспекты, необходимые для реализации заданных прогнозных значений изменения содержания  $\text{CO}_2$  и глобальной температуры. Допустимый суммарный объем парниковых газов, который может быть выброшен в атмосферу до конца XXI века, для того, чтобы глобальная температура не превысила допустимого уровня, определяется исходя из концепции линейной связи суммарной накопленной эмиссии и изменения глобальной температуры (MacDougall, 2016).

Наиболее реально сократить выбросы  $\text{CO}_2$  от крупных энергетических источников, которые относительно просто оснастить системами улавливания  $\text{CO}_2$  из дымовых газов. Однако, рассматривая перспективы снижения выбросов, следует учитывать значительную технологическую инерционность энергетики как основного источника  $\text{CO}_2$ . Продолжительность работы обычной топливной электростанции составляет не менее 40 лет (van Vuuren et al.,

2013). Пока предприятие действует нормально и приносит прибыль, отсутствует стимул к его коренной реконструкции или полной замене на новое. Оснащение улавливателями  $\text{CO}_2$  бесчисленных мелких источников представляется нереальным.

На современном этапе нет альтернативы жидкому углеводородному топливу, используемому в авиации. Массовый перевод еще одного значимого источника выбросов углерода – автотранспорта на электрические двигатели займет не один десяток лет (притом, что производство необходимой для этого электроэнергии в существенной степени так же сопряжено с выбросами  $\text{CO}_2$ ). Наконец, улавливание  $\text{CO}_2$  является лишь первой ступенью в инфраструктуре снижения выбросов, которая должна включать систему сбора уловленного газа, его транспортировку и надежное захоронение.

Безусловно важным способом сокращения выбросов  $\text{CO}_2$  является повсеместная замена в энергетике углеродоемких ископаемых топлив (каменный уголь) на низкоуглеродные (природный газ). Заметный вклад в энергетический баланс могут дать альтернативные источники энергии – солнечной, ветровой, приливной, волновой и др. Однако, такой путь требует существенной технологической перестройки энергетики, что займет не один десяток лет. Кроме того, мощность энергетических установок на основе альтернативных источников энергии зависит от суточных, сезонных или других случайных факторов (наличие ветра, например). Ускоренное развитие ядерной энергетики наталкивается на сопротивление широких слоев общественности.

При прогнозировании темпов сокращения выбросов парниковых газов практически неисследованным остается социальный вопрос, связанный с необходимостью сокращения рабочих мест в сфере добычи и использования ископаемых топлив. Сюда можно отнести такие виды деятельности как разведка новых месторождений ископаемых топлив, их добыча, транспортировка, переработка и использование. В этой сфере заняты многие десятки миллионов узко квалифицированных специалистов. Потеря рабочих мест в указанных областях человеческой деятельности грозит возникновением острых социальных проблем, решение которых может занять десятки лет. К сожалению, эта проблема осталась вне рассмотрения Парижским соглашением 2015 года (COP 21).

Существенный вклад в сокращение выбросов может оказать повышение энергоэффективности и энергосбережения, как на стадии производства, так и на стадии потребления энергетических ресурсов. Однако серьезным препятствием для реализации этих подходов становится то, что для этого необходимо осознание проблемы широкими слоями населения, бизнесом и политиками.

Сказанное выше приводит к заключению, что основная цель снижения антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  – стабилизация концентрации парниковых газов в атмосфере может в принципе быть достигнута, однако уровень усилий, который для этого потребуется, может оказаться для человечества неприемлемым. Это означает, что вероятность реализации наиболее пессимистического сценария RCP8.5 остается весьма высокой.

---

В любом случае кардинальное сокращение выбросов CO<sub>2</sub> займет длительное время. Важным является то, что после стабилизации концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере будет сохраняться практически неизменной на протяжении десятилетий-столетий.

## **2. Улавливание CO<sub>2</sub> из атмосферы с последующим захоронением**

Второй подход основан на потенциальной возможности изъятия из атмосферы избыточного количества CO<sub>2</sub> для снижения парникового эффекта. Принципиальное отличие от методов первого подхода состоит в том, что CO<sub>2</sub> удаляется непосредственно из атмосферы (уже после того, как произошла эмиссия) с обязательным долговременным захоронением на срок по меньшей мере в несколько сотен лет.

В англоязычной литературе такой подход принято обозначать аббревиатурой CDR (Carbon Dioxide Removal – удаление CO<sub>2</sub>) или термином «negative emission» – негативная эмиссия. Этот подход направлен на удаление CO<sub>2</sub> из атмосферы за счет искусственного увеличения интенсивности природных стоков или создания новых стоков, несвойственных природе (NAS, 2015a). Заметим, что природное выведение CO<sub>2</sub> из атмосферы идет медленно с характерным временем в тысячи лет (Archer et al., 2009).

Большинство доступных в литературе сценариев развития, направленных на достижение стабилизации глобальной температуры на уровне 2°C или даже 1.5°C, предполагают использование методов «негативной эмиссии», начиная с середины XXI столетия. Такие методы подразумевают интенсивное и продолжительное удаление диоксида углерода из атмосферы (MacDougall, 2016). Это может быть достигнуто, например, в результате устойчивого лесопользования и восстановления лесов, увеличение абсорбции углерода почвами, производством древесного угля и совместным применением биотоплива и технологий улавливания и захоронения углерода. Для достижения поставленной цели в зависимости от сценария развития кумулятивное количество уловленного и захороненного углерода к 2100 году должно составить 1000-2000 Гт CO<sub>2</sub>.

Похожие оценки даны в работе Рябошапко и Ревокатовой (2015). Анализ практически всех описанных в литературе методов CDR показал, что даже одновременное применение всех доступных технологий не может обеспечить непревышение допустимого порога роста температуры +2°C лишь к концу XXII века при росте концентрации CO<sub>2</sub> в соответствии со сценарием RCP8.5. Суммарный потенциал удаления и захоронения углерода оценен в указанной работе в 670 Гт CO<sub>2</sub> к 2100 году, что может обеспечить снижение концентрации CO<sub>2</sub> на 84 ppm(v).

Кроме того, применение методов «негативной эмиссии» сопряжено с громадными технологическими и экономическими проблемами. Речь идет об абсолютно убыточном процессе, требующем изъятия из атмосферы с последующим надежным захоронением на длительный период многих сотен гига-тонн CO<sub>2</sub>. Трудности с развертыванием и применением CDR-методов сочетаются с тем обстоятельством, что они должны использоваться десятиле-

тиями для достижения ощутимого эффекта (Caldeira et al., 2013). Отметим, что пока предприняты попытки реализации пилотных проектов с темпом улавливания на уровне 1 Мт CO<sub>2</sub> в год, тогда как для получения ощутимого эффекта необходим темп изъятия CO<sub>2</sub> порядка 50 000 Мт/год.

В настоящее время повышенное внимание уделяется методу, основанному на замене ископаемых топлив на топлива из возобновляемой растительной массы. В этом случае топливом может служить древесина перестойных деревьев, быстрорастущие кустарники, например, свитчграсс (*Panicum Virgatum*) или высокопродуктивные водоросли. В англоязычной литературе метод обозначается аббревиатурой BECCS (Bio-Energy, Carbon Capture and Storage- «Биоэнергетика, улавливание и консервация углерода»). По сути метод BECCS основан на комбинации первого и второго подходов: растительность поглощает CO<sub>2</sub> непосредственно из атмосферы (второй подход), а сжигание растительности на предприятиях энергетики с улавливанием CO<sub>2</sub> с последующим захоронением относится, скорее, к первому подходу.

В идеальном варианте метод сбалансирован – количество удаленного из атмосферы CO<sub>2</sub> равно количеству изъятых из дымовых газов и законсервированного в резервуаре хранения. Однако широкое использование данного метода сопряжено с рядом трудностей. Во-первых, получение достаточного количества горючего растительного материала для использования в качестве топлива потребует отчуждения огромных сельскохозяйственных площадей, пресной воды и удобрений. Это в свою очередь может усилить миграцию людей, а также привести к нарушению биоразнообразия на значительных территориях.

Во-вторых, в отличие от ископаемых топлив, фитомасса обладает высокой влажностью. Так древесина при атмосферно-сухой сушке (без воздействия осадков) имеет влажность около 20%. Это означает, что при горении существенная доля энергии будет тратиться на нагрев и испарение воды. Даже абсолютно сухая древесина имеет значение теплотворной способности значительно меньшее, чем ископаемое топливо.

### ***3. Управление потоком приходящей на Землю солнечной радиации***

Третий подход основан на управляемом изменении баланса солнечной радиации, в первую очередь, за счет снижения потока приходящего коротковолнового излучения. В англоязычной литературе для его обозначения принято использовать аббревиатуру SRM (Solar Radiation Management – управление солнечной радиацией). Данный подход можно считать активным влиянием на климатическую систему Земли (Будыко, 1974b; Keith, 2000; Izrael, 2005). В этом случае речь идет об увеличении планетарного альbedo путем изменения отражающей способности подстилающей поверхности, облачного слоя, аэрозольного слоя в стратосфере или создания искусственных отражателей в открытом космосе (NAS, 2015b). Среди предложенных к настоящему моменту методов управления радиационным балансом только один – утоньшение перистых облаков (cirrus cloud thinning), призван не увеличить альbedo, а повысить пропускную способность атмосферы для увеличения потока длинноволновой радиации (Muri et al, 2014).

---

Наиболее реалистичным и эффективным с точки зрения влияния на глобальную температуру является метод на основе субмикронных сульфатных частиц, образующихся при окислении инжектируемых в стратосферу серосодержащих газов –  $\text{SO}_2$  или  $\text{H}_2\text{S}$  (Будыко, 1974b; NAS, 2015b; Keith, 2000). Речь, по сути, идет о создании в нижней стратосфере постоянно действующего «виртуального вулкана», извергающего исключительно серосодержащие газы. Модельными расчетами показано, что метод стратосферных аэрозолей способен обеспечить сохранение глобальной температуры в пределах  $+2^\circ\text{C}$  до 2100 года при самом неблагоприятном сценарии роста концентрации  $\text{CO}_2$  – RCP8.5. Однако для обеспечения этого условия необходимо будет ежегодно инжектировать в нижнюю стратосферу к 2100 году 4,5 Мт серы в виде названных выше газов (Izrael et al., 2014). При задании условия непревышения средней глобальной температуры на  $1,5^\circ\text{C}$  величина инъекции соединений серы в стратосферы должна быть заметно увеличена.

Методы SRM не устраняют первопричины климатических изменений, но способны компенсировать нежелательные температурные изменения на глобальном уровне. Таким образом, если первопричина не устранена, метод должен применяться неопределенно долго и со все возрастающей интенсивностью. Он может быть востребован на относительно короткий период времени для того, чтобы не допустить превышение глобальной температурой пороговых уровней (этот сценарий получил в англоязычной литературе название “peak-shaving” – «сглаживание пиков»).

Метод SRM, основанный на инъекции в стратосферу серосодержащих газов, имеет четкое физическое обоснование и наличие природного аналога в виде действия стратосферного вулканического аэрозоля, вызывающего падение приземной температуры после мощных вулканических извержений. К достоинствам этого метода следует отнести возможность быстрого развертывания и быстрого достижения желаемого эффекта при относительно низкой стоимости.

Нобелевский лауреат П. Крутцен (Crutzen, 2006) недвусмысленно заявил, что целенаправленное изменение параметров климатической системы Земли – инженерия климата – «является единственным доступным путем быстрого снижения температуры, если провалятся международные усилия обуздать эмиссию парниковых газов. Здесь мало причин, быть оптимистом». Неуклонный рост выбросов парниковых газов и рост их концентрации полностью подтверждают опасения Крутцена.

Для оценки необходимости принятия тех или иных инженерных мер борьбы с глобальным потеплением целесообразно рассматривать наиболее неблагоприятные сценарии роста концентрации  $\text{CO}_2$ . Это положение основано на том, что подготовка к предотвращению климатического кризиса инженерными методами (моделирование, проведение мелкомасштабных экспериментов, разработка технологий) не потребует больших затрат, но даст возможность быстрого начала использования инженерных технологий при возникновении угрожающей ситуации. Наоборот, использование оптимистичных сценариев роста концентраций парниковых газов может привести к тому,

что человечество окажется не готовым к противодействию развитию катастрофической ситуации, что чревато колоссальными экономическими и социальными потрясениями. Исходя из сказанного, следует, что реализация сценариев RCP2.6 и RCP4.5 не повлечет за собой необходимости практического использования методов управления солнечной радиацией. Напротив, реализация сценариев RCP6.0 и RCP8.5 чревата угрозой развития климатического кризиса и необходимостью принятия экстренных мер инженерии климата методами SRM.

### **Очередность реализации подходов к решению климатической проблемы**

Представляется, что в условиях высокой неопределенности климатических прогнозов имеет смысл быть готовыми к использованию всех трех подходов к решению климатической проблемы. Это, в частности, означает необходимость (наряду с резким сокращением выбросов) разработки инженерных мер воздействия на климатическую систему Земли в соответствии со вторым и третьим подходами (van Vuuren et al., 2013).

Не вызывает сомнения тот факт, что ускоренными темпами должны использоваться возможности замены топливной энергетики на безуглеродную. Однако полный отказ от использования ископаемых топлив в текущем столетии не представляется реальным. Как уже отмечалось выше, маловероятен перевод авиации и судоходства на безуглеродные энергоносители (например, водород). Частичным решением проблемы может стать оснащение всех крупных энергетических установок системами улавливания  $\text{CO}_2$  из дымовых газов и его транспортировка к местам надежного долговременного захоронения. Таким образом первым шагом в решении климатической проблемы должен стать поиск резервуаров захоронения с суммарной емкостью порядка сотен гигатонн  $\text{CO}_2$ .

Информация по улавливанию и захоронению  $\text{CO}_2$  была обобщена экспертами МГЭИК в специальном отчете (IPCC, 2005). Отчет наметил несколько перспективных вариантов достаточно надежной консервации уловленного  $\text{CO}_2$ . Однако, оценки времени удержания (времени жизни)  $\text{CO}_2$  в литературе характеризуются высокой степенью неопределенности. Исключительно важным шагом является оценка риска интенсивного (неконтролируемого) выхода  $\text{CO}_2$  из резервуара захоронения в приземный слой атмосферы, чреватый смертельной опасностью для населения, проживающего вблизи района захоронения.

Наиболее перспективным представляется метод закачки  $\text{CO}_2$  в глубинные рассолы, где он в виде бикарбонат-иона может сохраняться неопределенно долго (IPCC, 2005). При этом открытым остается вопрос о емкости захоронения в расчете на одну скважину и о скорости процесса поглощения  $\text{CO}_2$  рассолом.

Несомненными преимуществами обладает метод, основанный на внесении в почву, в речную или морскую воду силикатных минералов типа оливина

---

$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ ) или альбита ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) в виде порошка тонкого размола (Schuiling, de Boer, 2010; Hartmann et al., 2013). Образующаяся в результате растворения  $\text{CO}_2$  угольная кислота нейтрализуется силикатами, обладающими щелочными свойствами, с образованием нерастворимых карбонатов и диоксида кремния. Однако, следует отметить, что тонкий размол минералов весьма энергозатратный процесс, учитывая, кроме того, огромные затраты на транспортировку миллиардов тонн исходных минералов. Создание необходимой инфраструктуры для применения указанных методов «негативной эмиссии» с ощутимым потенциалом захоронения, безусловно, нереально в пределах 21-ого века.

Сказанное выше означает, что в первую очередь максимально полно должен быть использован потенциал улавливания  $\text{CO}_2$  на крупных предприятиях топливной энергетики. Кроме того, должна быть отработана методология транспортировки уловленного  $\text{CO}_2$  от источника до резервуара захоронения. Технически это весьма сложный вопрос, поскольку масса эмитированного  $\text{CO}_2$  при горении существенно больше массы сожженного топлива (например, при сгорании тонны угля выделяется более 3 тонн  $\text{CO}_2$ ).

Указанные выше проблемы характерны и для большинства методов второго подхода, основанных на улавливании  $\text{CO}_2$  из окружающего воздуха. Здесь возникает дополнительная проблема – концентрация  $\text{CO}_2$  в воздухе в 300-400 раз ниже, чем в дымовых газах при сжигании ископаемых топлив. Естественно, технологически существенно легче изъять  $\text{CO}_2$  из концентрированной смеси. Таким образом, широкое использование метода изъятия  $\text{CO}_2$  из атмосферы должно начаться тогда, когда будет близок к исчерпанию потенциал метода на основе улавливания  $\text{CO}_2$  из дымовых газов.

В работе Рябошапко и Ревокатовой (2015) показано, что при росте концентрации  $\text{CO}_2$  по сценарию RCP8.5 даже вся совокупность методов CDR, предложенная к настоящему времени, не сможет обеспечить стабилизацию концентрации  $\text{CO}_2$  на условно безопасном уровне ( $+2^\circ\text{C}$ ). Превышение этого порога произойдет уже в середине 21 века. Порог в 1.5 градуса будет перейден существенно ранее. Вполне вероятно, что для недопущения превышения порогов в 1.5 и 2 градуса человечество должно быть готовым применить активные методы воздействия на климатическую систему Земли (SRM) в дополнение к усилиям по сокращению выбросов и извлечению из атмосферы избытка углекислого газа.

Методы управления солнечной радиацией не устраняют причин глобального потепления, поэтому должны применяться лишь временно и столь долго, сколь долго будет расти концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере. С учетом относительной дешевизны в реализации, метод «стратосферных аэрозолей» может быть развернут в течение 3-5 лет в том случае, если первые два подхода не дадут должного эффекта. Однако помимо технических аспектов создания аэрозольного слоя в стратосфере существует множество других – политических, этических, социальных, юридических. Эти вопросы требуют подробных исследований, и принятия некоторых мер, необходимых для возможности реализации методов SRM в будущем. Например, необходимо

создание международного органа по управлению и контролю в области SRM, который, на первом этапе, будет осуществлять проведение и регулирование тестовых полевых экспериментов (Lawrence, Crutzen, 2016; Sandler, 2017). Теоретическое время начала использования метода «стратосферных аэрозолей» можно отнести к середине или концу текущего века.

### Выводы

1) В настоящему моменту сформировалось три подхода к стабилизации глобальной приземной температуры: сокращение антропогенных выбросов парниковых газов (традиционный), удаление из атмосферы накопленного избытка CO<sub>2</sub> (методы «негативной эмиссии») и компенсация парникового эффекта путем снижения потока приходящей солнечной радиации (методы SRM).

2) Несмотря на международные усилия по сокращению выбросов CO<sub>2</sub>, его концентрация в атмосфере продолжает расти. Причем скорость роста в последние годы только увеличивалась. Стабилизация концентрации парниковых газов в атмосфере может быть достигнута, однако сокращение выбросов CO<sub>2</sub> займет длительное время. Кроме того, даже после стабилизации, концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере будет сохраняться практически неизменной на протяжении десятилетий-столетий.

3) Методы «негативной эмиссии» устраняют первопричину изменения климата – удаляют накопленный CO<sub>2</sub> из атмосферы. Однако они сопряжены с огромными технологическими и экономическими проблемами. Методы CDR для достижения ощутимого эффекта должны использоваться десятилетиями, их невозможно применить, как экстренную меру, поскольку время развертывания и совершенствования технологии займет длительный период времени. Кроме того, извлечение CO<sub>2</sub> должно происходить обязательно с последующим долговременным захоронением (на срок в несколько сотен лет), что существенно усложняет процесс и увеличивает его стоимость.

4) Методы SRM не устраняют первопричины климатических изменений, но способны компенсировать рост температуры на глобальном уровне даже при реализации наиболее неблагоприятного сценария RCP8.5. Наиболее перспективным является метод «стратосферных аэрозолей», основанный на создании отражающего слоя аэрозоля в нижней стратосфере. Этот метод может быть развернут в сжатые сроки (несколько лет) и практически сразу же дать ощутимый эффект. Применение SRM может осуществляться в промежутки времени, когда глобальная температура перейдет пороговое значение, а другие методы будут не способны резко ее понизить (сценарий “peak-shaving”).

5) При политическом планировании в области стабилизации температуры на допустимом уровне наиболее разумно опираться на самые неблагоприятные сценарии роста парниковых газов в атмосфере. В условиях неопределенности климатических прогнозов человечеству необходимо быть готовым к использованию всех трех подходов к решению климатической проблемы.

---

### Список литературы

- Будыко М. И. 1974а. Изменение климата. – Л., Гидрометеоиздат, 280 с.
- Будыко М. И. 1974б. Метод воздействия на климат. – Метеорология и Гидрология, № 2, с. 91-97.
- Рябошапко А.Г., Ревокатова А.П. 2015. Потенциальная роль негативной эмиссии диоксида углерода в решении климатической проблемы. – Метеорология и гидрология, № 7, с. 18-36.
- Archer D., Eby M., Brovkin V., Ridgwell A., Cao L., Mikolajewicz U., Caldeira K., Matsumoto K., Munhoven G., Montenegro A., Tokos K. 2009. Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide. – Annual Reviews: Earth and Planetary Sciences, vol. 37, pp. 117-134. DOI:10.1146/annurev.earth.031208.100206.
- Caldeira K., Bala G., Long Cao. 2013. The science of geoengineering. – Annual Review of Earth and Planetary Science, vol. 41, pp. 231-256. DOI: 10.1146/annurev-earth-042711-105548.
- Callendar G.S., 1938. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. – Quat. J. of Royal Meteorol. Soc., pp. 223-240.
- Clarke L., Jiang K., Akimoto K., Babiker M., Blanford G., Fisher-Vanden K., Hourcade J.-C., Krey V., Kriegler E., Löschel A., McCollum D., Paltsev S., Rose S., Shukla P.R., Tavoni M., van der Zwaan B.C. C., van Vuuren D.P. 2014. Assessing Transformation Pathways. – In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Crutzen P.J. 2006. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injection: A contribution to resolve a policy dilemma? – Climatic Change, vol. 77, pp. 212-219. DOI:10.1007/s10584-006-9101-y.
- EU CCEG. 2008. The 2 Degree Celsius Target: Information Reference Document: Background on Impacts, Emission Pathways, Mitigation Options and Costs. EU Climate Change Expert Group. URL: [http://ec.europa.eu/clima/policies/international/docs/brochure\\_2c.pdf](http://ec.europa.eu/clima/policies/international/docs/brochure_2c.pdf).
- Hartmann J., West A.J., Renforth P., Köhler K., De La Rocha C.L., Wolf-Gladrow D.A., Dürr H.H., Scheffran J. 2013. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification. – Reviews of Geophysics, vol. 51, paper number 2012RG000404, pp.113-149. DOI:10.1002/rog.20004.
- IEA. 2016. CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion (highlights). – International Energy Agency, OECD/IEA, 166 p.
-

IPCC. 2005. IPCC Special Report on Carbon Capture and Storage, (ed. by Metz B., Davidson O., de Conink H., Loos M. and Meyer L.). – Cambridge University Press, 442 p.

Izrael Yu.A. 2005. An efficient way to regulate the global climate is the main objective of the solution of the climate problem. – Russian Meteorology and Hydrology, No. 10, pp. 1-4.

Izrael Yu.A., Volodin E.M., Kostykin S.V., Revokatova A.P., Ryaboshapko A.G. 2014. The ability of stratospheric climate engineering in stabilizing global mean temperatures and an assessment of possible side effects. – Atmos. Sci. Let., vol. 15, pp. 140-148. DOI: 10.1002/asl2.481.

Lawrence M., Crutzen P. 2016. Was breaking the taboo on research on climate engineering via albedo modification a moral hazard, or a moral imperative? – Earth's Future. DOI:10.1002/2016EF000463.

MacDougall A.H. 2016. The transient response to cumulative CO<sub>2</sub> emissions: a review. – Curr. Clim. Chang. Rep., vol. 2, pp. 39-47.

Muri H., Kristjánsson J. E., Storelvmo T., Pfeffer M. A. 2014. The climatic effects of modifying cirrus clouds in a climate engineering framework. – J. Geophys. Res. Atmos., vol. 119, pp. 4174-4191. DOI:10.1002/2013JD021063.

NAS. 2015a. Climate intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration. – National Research Council of US National Academy of Science, The National Academic Press, Washington, D.C., 126 p.

NAS. 2015b. Climate intervention: Reflecting sunlight to cool the Earth. – The National Academic Press, Washington, D.C., 220 pp. Available at: [www.nap.edu](http://www.nap.edu).

PBL Netherlands Environment Assessment Agency. 2016. Trends in Global CO<sub>2</sub> Emissions. – 2016 Report, 82 p.

Riahi K., Gruebler A., Nakicenovic N. 2007. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. – Technological Forecasting and Social Change, vol. 74, No. 7, pp. 887-935.

Ricke K.L., Caldeira K. 2014. Maximum warming occurs about one decade after a carbon dioxide emission. – Environ Res Lett., vol. 9(12), 124002. DOI:10.1088/1748-9326/9/12/124002.

Sandler T. 2017. Collective action and geoengineering. – Rev. Int. Organ. doi:10.1007/s11558-017-9282-3.

Schuiling R.D., de Boer P.L. 2010. Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: A critical analysis of viability. Comment: Nature and laboratory models are different. – International Journal of Greenhouse Gas Control, vol. 4, No. 5, pp. 855-856. DOI:10.1016/j.ijggc.2010.04.012

Smith P., Haberl H., Popp A., Erb K.-H., Lauk C., Harper R. Tubiello F.N., de Siqueira Pinto A., Jafari M., Sohi S., Masera O., Böttcher H., Berndes G., Bustamante M., Ahammad H., Clark H., Dong H., Elsiddig E.A., Mbow C.,

---

Ravindranath N.H., Rice C.W., Robledo Abad C., Romanovskaya A., Sperling F., Herrero M., House J.I., Rose S. 2013. How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals? – *Global Change Biology*, vol. 19, issue 8, pp. 2285-2302. DOI: 10.1111/gcb.12160.

van Vuuren D.P., Deetman S., van Vliet J., van den Berg M., van Ruijven B.J., Koelbl B. 2013. The role of negative CO<sub>2</sub> emissions for reaching 2°C – insights from integrated assessment modeling. – *Climatic Change*, vol. 118, pp. 15-27. DOI: 10.1007/s10584-012-0680-5.

Статья поступила в редакцию: 17.10.2017 г.

После переработки: 19.11.2017 г.