

# РОЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЕСОВ И НОВЫХ ЛЕСОПОСАДОК В СНИЖЕНИИ КОНЦЕНТРАЦИИ CO<sub>2</sub> В АТМОСФЕРЕ

А.Г. Рябошапка<sup>1)</sup>, А.П. Ревокатова<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,  
РФ, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, [agryaboshapko@mail.ru](mailto:agryaboshapko@mail.ru)

**Резюме.** Эксперты Рамочной Конвенции ООН об изменении климата считают, что восстановление ранее сведенных лесов и разведение новых является эффективным методом удаления избытка CO<sub>2</sub> из атмосферы. В данной работе рассмотрен процесс поглощения CO<sub>2</sub> вновь посаженным лесом в совокупности с обратным процессом ре-эмиссии CO<sub>2</sub> за счет разложения отмершей фитомассы. Время круговорота углерода в лесной экосистеме умеренной и бореальной зон принято равным 50 годам. Предположено, что посадка леса произойдет в 2030 году одновременно на площади  $8,4 \times 10^5$  км<sup>2</sup> в умеренной и бореальной зонах Северного полушария. Оценки показали, что через два-три десятка лет нетто-поглощение CO<sub>2</sub> достигнет примерно 2 Гт/год, после чего будет снижаться практически до нуля к концу 23-его века. Кумулятивно к концу текущего века метод позволит удалить из атмосферы около 100 Гт CO<sub>2</sub>. При сценарии роста концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере RCP8.5 (“Business As Usual”) эта величина составит лишь 4% от требуемого количества для сохранения глобальной температуры на уровне +2°C над доиндустриальным значением.

**Ключевые слова.** Поглощение CO<sub>2</sub>, лесопосадки, восстановление лесов, ре-эмиссия, кумулятивное поглощение.

## ROLE OF REFORESTATION AND AFFORESTATION IN REDUCING ATMOSPHERIC CO<sub>2</sub> CONCENTRATION

A.G. Ryaboshapko<sup>1)</sup>, A.P. Revokatova<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Institute of Global Climate and Ecology,  
Glebovskaya str., 20B, 107258, Moscow, Russia, [agryaboshapko@mail.ru](mailto:agryaboshapko@mail.ru)

**Summary.** Experts of UN Framework Convention on Climate Change suppose that reforestation and afforestation are effective methods for removal of excess of CO<sub>2</sub> from the atmosphere. In this paper, the process of removing CO<sub>2</sub> by newly planted forest is considered in conjunction with reverse process of CO<sub>2</sub> re-emission due to decomposition of died-off phytomass. Fifty years is adopted as a turn-over time of carbon in forest ecosystems of temperate and boreal zones. It is assumed that forests will be planted over area of  $8.4 \times 10^5$  km<sup>2</sup> in temperate and boreal zones of the Northern Hemisphere as a single-stage operation in 2030. Calculations showed that in two to three decades the net-absorption of CO<sub>2</sub> will reach approximately 2 Gt/yr and will decrease thereafter practically to zero by the end of the 23rd century. The reforestation/afforestation methods can ensure cumulative CO<sub>2</sub> removal of about 100 Gt by the end of this century. If atmospheric CO<sub>2</sub> concentration increases in accordance with RCP8.5 (“Business As Usual”) scenario, this

value will make up only 4% of those needed for global temperature stabilization at +2°C above the pre-industrial level.

**Keywords.** CO<sub>2</sub> removal, afforestation, reforestation, re-emission, cumulative capture.

### Введение

Значительная доля органического углерода в глобальном углеродном цикле представлена лесными экосистемами. Оценки различных авторов показывают, что удельное содержание углерода в древостое варьирует в пределах от 50 до 120 т С/га (Исаев и др., 1993; Чураков и др., 2012; Olson et al, 1983 (цит. по Исаев и др., 1993)). Суммарно, с учетом содержания органического углерода в лесном опаде и в лесных почвах эта величина может достигать 500 т С/га. С начала индустриальной революции площадь лесов заметно сократилась, в первую очередь, за счет расширения площади сельскохозяйственных земель. Учитывая значительную углеродную емкость лесных экосистем, возникла идея восстановления лесов и организации новых лесопосадок в качестве меры борьбы с накоплением CO<sub>2</sub> в атмосфере (NAS, 1992). Некоторые эксперты считают, что восстановление ранее вырубленных лесов и дополнительные лесопосадки являются одним из наиболее эффективных методов смягчения последствий изменения климата (Malmshemer et al., 2008). Существуют исследования, в которых показано, что усвоение углерода за счет облесения окажет тот же эффект на температуру Земли, как и сокращение выбросов в атмосферу того же количества углерода (Kirschbaum, 2003).

Данный вариант удаления CO<sub>2</sub> из атмосферы имеет то существенное ограничение, что он действует лишь на относительно коротком участке временной шкалы, когда поглощение CO<sub>2</sub> из атмосферы вновь посаженным лесом существенно превышает обратный поток ре-эмиссии, обусловленный разложением отмершей фитомассы. Заметим, что распространенное мнение о том, что леса России поглощают из атмосферы существенную долю антропогенного CO<sub>2</sub>, не учитывает того, что наряду с поглощением идет одновременный процесс ре-эмиссии. Без долговременного захоронения древесины (или продуктов ее переработки) положительный эффект метода сохраняется непродолжительное время (Russell et al., 2012). Относительное постоянство темпа поглощения CO<sub>2</sub> при ведении управляемого лесного хозяйства может быть обеспечено лишь регулярным удалением из лесной экосистемы отмерших древесных остатков и деревьев, прошедших стадию спелости (Ning Zeng et al., 2013). Важнейшим условием при этом является обеспечение долговременного хранения удаленного материала. Подобная схема представляется нереалистичной. Возможно, однако, использование растительных остатков для производства энергии с улавливанием CO<sub>2</sub> из дымовых газов или для производства древесного угля. Последний вариант предусматривает захоронение размолотого древесного угля в культивируемых почвах (Рябошапко, Ревокатова, 2015). Следует помнить, что любое изъятие сельскохозяйственных земель под лесопосадки нахо-

дится в конфронтации с задачей обеспечения продуктами питания растущего населения Земли.

Следует заметить, что изменение концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере при сведении лесов и при лесопосадках может быть не единственным климатообразующим фактором. Влияние на климат может реализоваться за счет увеличения транспирации и изменения альбедо поверхности. Модельные расчеты дают противоречивые результаты — лесопосадки могут как снизить, так и увеличить приземную температуру. Так, в работе (Swann et al., 2010) утверждается, что лесопосадки в бореальной зоне могут привести к росту приземной температуры. Однако большинство экспертов рассматривают дополнительные лесопосадки как способ удаления  $\text{CO}_2$  из атмосферы с целью снижения парникового эффекта (IPCC, 2014; NAS, 2015). Поскольку лесопосадки достаточно дешевы и могут быть осуществлены в короткие сроки, важным достоинством такого подхода считается выигрыш времени для развития безуглеродной энергетики.

Целью настоящей работы является определение динамики поглощения  $\text{CO}_2$  вновь посаженным лесом и оценка величины кумулятивного удаления  $\text{CO}_2$  из атмосферы в долгосрочной перспективе, т.е. в течение XXI–XXIII веков. Заметим, что в работах по данной теме авторы часто ограничиваются рассмотрением ситуации на относительно коротких временных интервалах, как правило – до 2050 года (Замолодчиков, Грабовский, 2014; Романовская, Федеричи, 2015). По нашему мнению, следует рассматривать временную шкалу, соизмеримую со временем жизни типичного дерева и временем существования его разлагающихся остатков. Для климатических прогнозов важны значения кумулятивного накопления  $\text{CO}_2$  за длительный период, т.е. того количества  $\text{CO}_2$ , которое удалено из атмосферы и законсервировано во вновь созданной лесной экосистеме. Оценки того, как могут измениться собственно климатические характеристики Земли в результате лесопосадок выходят за рамки данной работы.

### **Разведение лесов с целью удаления $\text{CO}_2$ из атмосферы**

На первом этапе жизненного цикла растение является поглотителем  $\text{CO}_2$ , за счет которого происходит прирост массы, другими словами, консервирование атмосферного  $\text{CO}_2$  в виде фитомассы. Наиболее интенсивно этот процесс идет в молодых насаждениях с возрастом около 35 лет (Кудрявцев, 2002; NAS, 2015). По мере достижения зрелости древостоев интенсивность прироста и, соответственно, поглощения  $\text{CO}_2$  падает. При опадении или отмирании растения органический материал начинает разлагаться с выделением  $\text{CO}_2$  в атмосферу. Однако в долгосрочной перспективе лесная экосистема находится в динамическом равновесии по отношению к атмосферному  $\text{CO}_2$  (Russell et al., 2012; NAS, 2015), при этом входящий и выходящий потоки для равновесной лесной экосистемы остаются на высоком уровне (Замолодчиков, 2011).

Процесс роста растения и процесс разложения могут занимать заметное время, в течение которого определенное количество  $\text{CO}_2$  будет изъято из атмосферы и временно законсервировано в виде древесины, корней, почвенного углерода. Детальная информация о характере прироста фитомассы различных видов

растений лесов Евразии приведена в работе (Швиденко и др., 2006). Исаев и др. (1993) обобщили данные о состоянии лесов России на конец XX века и показали, что запас углерода в фитомассе лесов России составляет около  $3,9 \times 10^{10}$  т, а темп депонирования углерода из атмосферы оценен величиной  $1,84 \times 10^8$  т/год. Если принять, что основная доля лесов России находится в состоянии динамического равновесия относительно входящих и выходящих потоков углерода, среднее время жизни углерода в совокупной лесной экосистеме составит  $3,9 \times 10^{10} / 1,84 \times 10^8 \approx 210$  лет. Эта величина близка к оценке, приведенной в работе (Carvalho et al., 2014) для северных лесов (255 лет).

Можно утверждать, что на территории развивающихся стран в ближайшие 1-2 десятилетия процесс разведения и восстановления лесов вообще нереален — здесь продолжается процесс сведения существующих лесов. В работе (Raupach et al., 2007) указывается, что только в тропиках за счет вырубки леса в атмосферу поступает  $5,5$  ГтСО<sub>2</sub>/год, что составляет более 15% суммарного антропогенного выброса. Доклад Национальной академии наук США (NAS, 2015) отмечает, что эмиссия СО<sub>2</sub> в атмосферу за счет землепользования с 1750 года составила около 660 ГтСО<sub>2</sub>. Эту величину можно рассматривать как предельно возможную оценку поглощения СО<sub>2</sub> при восстановлении ранее уничтоженных лесов. Реально величина поглощения должна быть существенно меньше, поскольку территории, ранее занятые лесами, необратимо переведены в категорию сельскохозяйственных земель.

При использовании всех существующих резервов США могли бы выделить под разведение лесов максимум 0,3 млн. кв. км или 3% своей площади (NAS, 1992). Примем в качестве максимально возможной оценки, что США, Канада и страны Европы (включая европейскую Россию) одновременно произведут лесопосадки на 3% площади своих территорий (~840 тыс. кв. км). При ежегодном приросте фитомассы леса порядка  $100$  т С/км<sup>2</sup>/год (Исаев и др., 1993; Кудрявцев, 2002) начавшийся процесс консервации СО<sub>2</sub> будет на первых порах изымать из атмосферы около 0,3 Гт СО<sub>2</sub>/год. Это менее одного процента от ежегодной мировой антропогенной эмиссии СО<sub>2</sub>. Более высокие значения оценки могут быть получены при использовании данных работы (NAS, 2015), где темп нетто поглощения оценен диапазоном  $150-450$  т СО<sub>2</sub>/км<sup>2</sup>/год для бореальных лесов и  $550-1600$  т СО<sub>2</sub>/км<sup>2</sup>/год для лесов умеренной зоны.

Данные литературы о темпе поглощения СО<sub>2</sub> вновь посаженными лесами и о кумулятивном потенциале данного метода удаления СО<sub>2</sub> из атмосферы перечислены в таблице. В ней также представлены характерные времена жизни углерода в лесной фитомассе. Заметим, что оценки темпа удаления СО<sub>2</sub>, показанные в таблице, заметно выше приведенной ранее оценки на основании данных лишь для бореальных лесов. Это представляется естественным, поскольку для бореальных лесов характерен выраженный сезонный ход скорости разложения отмершей фитомассы. Базируясь на данных таблицы в качестве максимально возможной оценки принимаем, что темп поглощения СО<sub>2</sub> при разведении и восстановлении лесов может достичь  $3$  Гт СО<sub>2</sub>/год.

**Таблица 1 — Потенциальные возможности удаления CO<sub>2</sub> из атмосферы путем разведения лесов и время удержания углерода в растительной массе**

Ссылка	Возможный темп удаления CO <sub>2</sub> , ГтCO <sub>2</sub> /год	Кумулятивный потенциал, ГтCO <sub>2</sub> до 2300 г.	Время жизни углерода в лесной экосистеме, лет
На основе (Исаев и др., 1993)			210 (для лесов России)
Филиппчук, 2003			80–120
Van Vuuren et al., 2013	От 0 до 4		
McLaren, 2012	1,5–3		
Meadowcroft, 2013	5,5 (к 2050 г.)	1100	
Smith, Torn, 2013	3,7	185	50
Canadell, Raupach, 2008	2,9–5,1	290–510	десятилетия
Sitch et al., 2005	1,8	175	
Russell et al., 2012			100
Raupach et al., 2007	1,5–2,9		
IPCC, 2012		550–730	
Lenton, Vaughan, 2009		290 (к 2035 году)	
		320 (к 2050 году)	
		345 (к 2060 году)	
		670 (к 3000 году)	
Carvalhais et al., 2014			в тропиках — 15
			в высоких широтах — 255
			глобально среднее — 23
Brown et al., 1996 (цит. по NAS, 2015)	4–6 <sup>(*)</sup>		
NAS, 2015		660 <sup>(*)</sup>	
Nilsson, Schopfhauser, 1995 (цит. по NAS, 2015)		380 <sup>(*)</sup>	

<sup>\*)</sup> максимально возможный физический потенциал на глобальном уровне

Время жизни углерода в биомассе леса обычно относят ко времени разложения собственно древесины, не учитывая того факта, что за время жизни дерева опад хвои, листьев и веток составляет существенную долю лесной биомассы. Скорость разложения лесного опада существенно выше, чем самой древесины, и находится в пределах 1–3 года. Так время жизни отмершей хвои Замолодчиков (Замолодчиков, 2011) оценил в 4–6 лет. При обычном гниении биомассы в почвах через 5–10 лет остается 10–20% исходного углерода. По данным работы (Lehmann et al., 2006) время жизни биоматериала в почвах

умеренных широт составляет около 1,5 лет, при этом лишь сравнительно небольшая масса опада преобразуется в гумус почвы (Замолодчиков, 2011).

Последние литературные данные показывают, что время круговорота углерода в лесных экосистемах может быть существенно короче ранее принятых значений (Carvalhais et al., 2014). По данным этих авторов время круговорота углерода в тропических лесах составляет всего 15 лет. Однако, если процесс восстановления лесов начнется, то это произойдет, скорее всего, в развитых странах Северного полушария, где время жизни углерода в лесных экосистемах продолжительнее, чем в тропиках. Исходя из сказанного, принимаем, что среднее время жизни отмершей биомассы в экосистемах новых лесопосадок составляет 50 лет (Smith, Torn, 2013; Canadell, Raupach, 2008). Выбор этой величины учитывает то, что в расчет принимаются леса умеренной и бореальной зон, быстрое разложение опада и быстрый круговорот углерода в почвах.

### Методология оценки

Будет разумным принять, что преобладание лесопосадок над вырубкой произойдет не ранее 2030 г. Посадка леса относится к достаточно дешёвым и хорошо освоенным технологиям. На основании данных работы (Швиденко и др., 2006) динамика изменения темпа поглощения  $\text{CO}_2$  вновь созданных посадок соснового леса в возрасте от 0 до 180 лет может быть описана степенным выражением типа:

$$S(\theta_i) = (c \cdot \theta^a \cdot (180 - \theta)^b) \cdot d \quad (1)$$

где  $a = 0,559$ ,  $b = 2,576$ ,  $c = 1,086 \times 10^{-6}$ ,  $d = 1.0205$ ,  $\theta$  – возраст посадок,  $S_i$  – ежегодное поглощение  $\text{CO}_2$  посадками в  $i$ -ом году (Гт $\text{CO}_2$ /год). Характер изменения темпа поглощения  $\text{CO}_2$  вновь посаженным сосновым лесом иллюстрируется рис. 1, демонстрирующим удовлетворительное согласие экспериментальной кривой (синяя) с кривой аппроксимации (красная). Сосна здесь выбрана как одна из наиболее распространенных древесных пород бореальной зоны Северного полушария (бонитет III). Как следует из рис. 1, максимальный темп поглощения  $\text{CO}_2$  посадками сосны достигается в возрасте 32 лет.

Далее следует учесть, что одновременно с изменением темпа поглощения будет протекать процесс разложения отмершей древесины и опада с выделением (ре-эмиссией)  $\text{CO}_2$  обратно в атмосферу со временем круговорота  $\tau = 50$  лет. В предположении наличия пропорциональности величины потока ре-эмиссии массе разлагающегося материала коэффициент пропорциональности составит  $K = 1/\tau = 1/50 = 0,02 \text{ год}^{-1}$ .

По мере гибели, по тем или иным причинам части посаженных деревьев, они будут замещаться деревьями второго и последующих поколений. На основании этого допускаем, что лесная экосистема при возрасте более 32 лет (на этапе стабилизации) в целом сохраняет устойчивость, т.е. темп поглощения  $\text{CO}_2$  будет оставаться на максимально достигнутом уровне с учетом действия процессов ре-эмиссии.

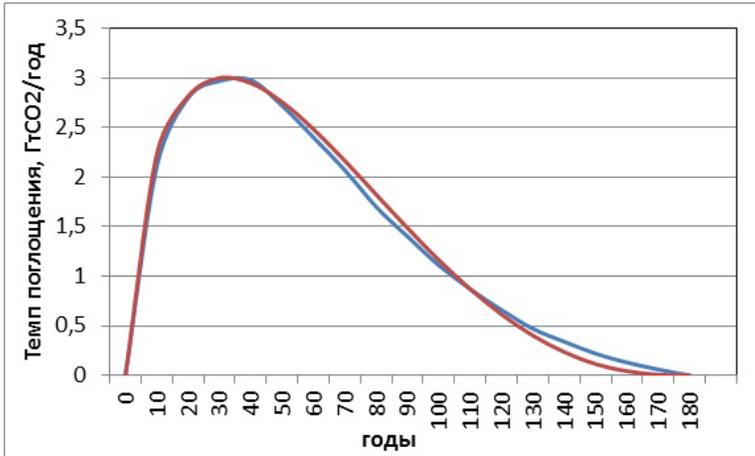


Рисунок 1 — Экспериментальная кривая, описывающая возрастную зависимость темпа поглощения CO<sub>2</sub> основными посадками (синий цвет) (Швиденко и др., 2006) и ее математическая аппроксимация (красный цвет).

Величина кумулятивного поглощения на каждом последующем расчетном шаге ( $CS_{(i+1)}$ ) вычисляется путем добавления к текущему значению ( $CS_i$ ) величины текущего ежегодного поглощения ( $S_i$ ) за вычетом ре-эмиссии из резервуара депонирования:

$$CS_{(i+1)} = CS_i + S_i - (CS_i + S_i) * K. \quad (2)$$

На этапе стабилизации величины текущего поглощения меняется лишь темп ре-эмиссии, а член  $S_{(i)}$  в выражении (2) становится постоянным и равным  $S_{max}$ :

$$CS_{(i+1)} = CS_i + S_{max} - (CS_i + S_{max}) * K. \quad (3)$$

Нетто-поток CO<sub>2</sub> из атмосферы в резервуар депонирования находится на каждом расчетном шаге как разница между  $CS_{(i+1)}$  и  $CS_i$ .

На всех стадиях существования вновь образованной лесной экосистемы будет идти процесс разложения отмершей фитомассы с ре-эмиссией CO<sub>2</sub> в атмосферу с темпом, пропорциональным количеству разлагающегося материала в экосистеме. Таким образом, нетто-поток CO<sub>2</sub> из атмосферы равен разнице между величиной поглощения и величиной ре-эмиссии.

### Результаты модельных оценок

Поток поглощения достигает максимальной величины (в соответствии с формулой 1) через 32 года и остается постоянным до конца расчетного периода. Сценарий использования новых лесопосадок для обеспечения нетто-поглощения CO<sub>2</sub> из атмосферы представлен графически на рис. 2. В силу того, что поток ре-эмиссии начинает проявляться сразу после посадки леса, нетто-поток достигает максимума к середине текущего века и составляет лишь ~2.1

ГтСО<sub>2</sub>/год (рис. 2, кривая а)). После достижения максимума растет поток ре-емиссии и нетто-поток поглощения СО<sub>2</sub> лесом начинает быстро снижаться до практически нулевой величины к 2300 году.

Как следует из рис. 2 (кривая б)), величина кумулятивного накопления углерода (в виде СО<sub>2</sub>) на первом этапе быстро растет, а затем постепенно ее рост замедляется, и величина кумулятивного поглощения становится практически постоянной в течение 23-его века. Предельный потенциал рассматриваемого метода удаления СО<sub>2</sub> из атмосферы составляет менее 140 ГтСО<sub>2</sub>. Основная доля кумулятивного выведения приходится на текущий век — к 2100 году метод позволяет удалить из атмосферы около 100 ГтСО<sub>2</sub> или 75% от максимального потенциала.

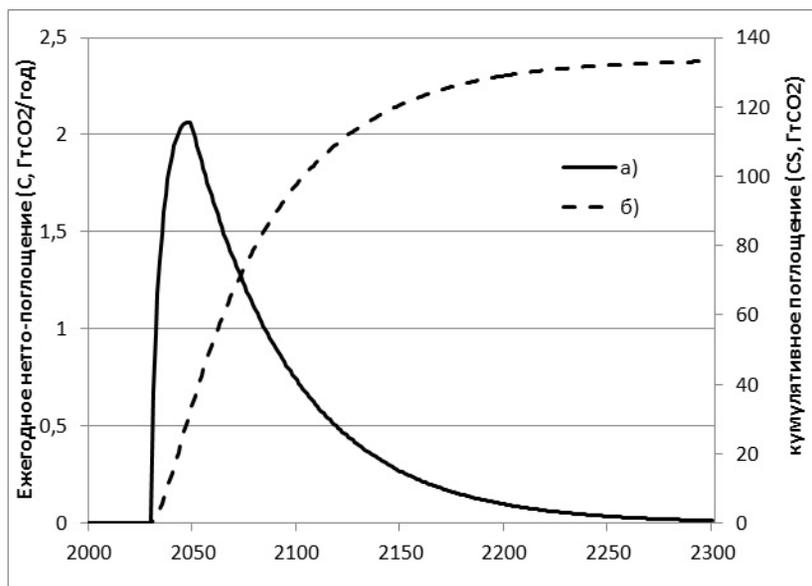


Рисунок 2 — Изменение во времени нетто-потока СО<sub>2</sub> (а) и кумулятивного поглощения СО<sub>2</sub> из атмосферы (б) за счет поглощения высаженным лесом.

Для стабилизации температуры на предельно допустимом уровне (+2°С над доиндустриальным значением (EU Climate Change Expert Group, 2008) при неблагоприятном сценарии роста концентрации СО<sub>2</sub> в атмосфере (сценарий МГЭИК RCP8.5) из атмосферы следует удалить к 2100 году около 2500 ГтСО<sub>2</sub> (IPCC, 2013; Рябошапко, Ревокатова, 2015). Таким образом, при росте концентрации СО<sub>2</sub> по сценарию RCP8.5 метод лесопосадок способен обеспечить удаление из атмосферы лишь 4% необходимого количества СО<sub>2</sub>.

При постановке более амбициозной задачи — вернуть концентрацию СО<sub>2</sub> к уровню 2000 года (369 ppmv) — оказывается, что даже при «благополучном» сценарии RCP4.5 лесопосадки к 2300 году могут обеспечить удаление из атмосферы не более 10% требуемого количества СО<sub>2</sub>. При наиболее агрессивном сценарии RCP8.5 за пределами 21-ого века метод практически

полностью теряет потенциал удаления CO<sub>2</sub> из атмосферы (примерно 1% от требуемого количества). Таким образом, отвечая на вопрос М. Киршбаума (Kirschbaum, 2003) «Могут ли деревья дать выигрыш во времени», можно заключить, что лесопосадки могут дать незначительный климатический эффект в течение относительно короткого промежутка времени (первые десятки лет).

### Заключение

Предложен алгоритм расчета кумулятивного поглощения CO<sub>2</sub> при разведении новых или восстановления ранее уничтоженных лесов, учитывающий как поглощение CO<sub>2</sub> из воздуха вновь созданной лесной экосистемой, так и ре-эмиссию CO<sub>2</sub> обратно в атмосферу за счет разложения отмершей фитомассы. Предположено, что посадка леса произойдет в 2030 году одновременно на площади  $8,4 \times 10^5$  км<sup>2</sup> в умеренной и бореальной зонах стран Северного полушария. Через три десятка лет после лесопосадки нетто-поглощение CO<sub>2</sub> достигнет примерно 2 Гт/год, после чего будет снижаться практически до нуля к концу 23-его века. Кумулятивно к концу текущего века метод позволит удалить из атмосферы около 100 ГтCO<sub>2</sub>.

На основании результатов выполненных расчетов можно сделать заключение о том, что метод удаления CO<sub>2</sub> из атмосферы путем создания новых лесопосадок может быть эффективным в течение лишь относительно короткого времени, исчисляемого первыми десятками лет. При прогнозируемом сценарии роста концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере (МГЭИК RCP8.5) величина 100 ГтCO<sub>2</sub> составит лишь 4% от требуемого количества для сохранения глобальной температуры на уровне +2°C к доиндустриальному значению. С учетом того, что оценки основаны на предельно высоких входных параметрах, можно заключить, что посадка лесов не сможет обеспечить решения проблемы глобального потепления.

### Благодарности.

*Авторы признательны Р.Т. Карабаню, М.Л. Гитарскому и Д.А. Северову за ценные советы.*

### Список литературы

- Замолодчиков Д.Г. 2011. Системы оценки и прогноз запасов углерода в лесных экосистемах. — Устойчивое Лесопользование, №4 (29), с. 15–22.
- Замолодчиков, Д.Г., Грабовский В.И., 2014. Прогнозные оценки лесных стоков на период до 2050 года и вклад лесного сектора в обязательства Российской Федерации по новому климатическому соглашению. — Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов в России», № 3, стр. 23-27 и № 4, стр. 31–34.

Исаев А.С., Коровин Г.Н., Уткин А.И., Пряжников А.А., Замолодчиков Д.Г. 1993. Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России. — Лесоведение, № 5, с. 3–10.

Кудрявцев В.А. 2002. Динамика фитомассы и углерода в лесокультурценозах ельников кисличных Тверской области. — Электронная библиотека диссертаций DissersCat, 137 с.

Романовская А.А., Федеричи С., 2015. Квота на выбросы и роль лесного сектора в национальных обязательствах Российской Федерации в новом климатическом соглашении. — Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. СПб.: СПбНИИЛХ, 2015. Вып. 1. — Издательство, стр. 20–38.

Рябошапко А.Г., Ревокатова А.П., 2015. Потенциальная роль «негативной эмиссии» CO<sub>2</sub> в решении климатической проблемы. — Метеорология и Гидрология, принята к печати в 2015 г (№ VII).

Филипчук А.Н. 2003. Справочник лесничего. 7-е издание (перераб. и доп.). — М., Издательство ВНИИЛМ, 640 с.

Чураков Б.П., Парамонова Т.А., Митрофанова Н.А., Загидуллина Л.И., Зырянова У.П., 2012. Распределение запасов древесины и депонированного углерода в фитомассе сосновых лесов в связи поражением их сосновой губкой. — Лесные Ресурсы. Известия Самарского научного центра РАН, том 14, № 1(8), стр. 2021–2023.

Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. 2006. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии. — М.: Федеральное агентство лесного хозяйства, 803 с.

Canadell J.P., Raupach M.R. 2008. Managing Forests for Climate Change Mitigation. — Science, Vol. 320, no. 5882, pp. 1456–1457. DOI: 10.1126/science.1155458

Carvalhais N., Forkel M., Khomik M., Bellarby J, Jung M., Migliavacca M., Mu M., Saatchi S., Santoro M., Thurner M., Weber, Ahrens B., Beer C., Cescatti A., Randerson J.T., Reichstein M. 2014. Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems. — Nature, doi:10.1038/nature13731

EU Climate Change Expert Group, 2008. The 2 Degree Celsius Target: Information Reference Document: Background on Impacts, Emission Pathways, Mitigation Options and Costs. -[http://ec.europa.eu/clima/policies/international/docs/brochure\\_2c.pdf](http://ec.europa.eu/clima/policies/international/docs/brochure_2c.pdf)

IPCC, 2012. IPCC Expert Meeting on Geoengineering. Meeting Report, Peru, Lima, 20-22 June 2011, ISBN 978-92-9169-136-4

IPCC, 2013. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of WG 1 to the AR5 of the IPCC. Stocker T.F. et al. (eds). — Cambridge Uni-

versity Press, Cambridge, UK and NY, USA, 1535 pp.

IPCC, 2014: 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.

Kirschbaum M. U. F., 2003. “Can trees buy time. An assessment of the role of vegetation sinks as part of the global carbon cycle”. — *Climatic Change*, v. 58, pp. 47–71.

Lehmann J., Gaunt J., Rondon M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems — a review. — *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 11, pp. 403–427.

Lenton T.M., Vaughan N.E. 2009. The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. — *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 9, pp. 5539–5561.

Malmshemer R.W., Heffernan P., Brink S., Grandall D., Deneke F., Galik C., Gee E., Helms J.A., McClure N., Mortimer M., Ruddell S., Smith M., Steward J., 2008. Forest management solutions for mitigating climate change in the United States. — *Journal of Forestry*, V. 106, No. 3, pp. 115-173.

McLaren D. 2012. A comparative global assessment of potential negative emissions technologies. — *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 90, pp. 489-500

Meadowcroft J. 2013. Exploring negative territory carbon dioxide removal and climate policy initiatives. — *Climatic Change*, Vol. 118, p. 137-149. DOI 10.1007/s10584-012-0684-1

NAS, 1992. US National Academy of Science. Policy Implications of Greenhouse Warming: Mitigation, Adaptation, and the Science Base. — Panel on Policy Implications of Greenhouse Warming. National Academies Press, Washington, DC, 994 p.

NAS, 2015. 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.

Ning Zeng, King A.W., Zaitchik B., Wullschlegler S.D., Gregg J., Shaoqiang Wang, Kirk-Davidoff D. 2013. Carbon sequestration via wood harvest and storage: An assessment of its harvest potential. — *Climatic Change*, DOI 10.1007/s10584-012-0624-0

Raupach M.R., Marland G., Ciais P., Le Quéré C., Canadell J.G., Klepper G., Field C.B. 2007. Global and regional drivers of accelerating global CO<sub>2</sub> emissions. — *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, 10288–

10293.

Russell L.M., Rasch P.J., Mace G.M., Jackson R.B., Shepherd J., Liss P., Leinen M., Schimel D., Vaughan N.E., Janetos A.C., Boyd P.W., Norby R.J., Caldeira C., Merikanto J., Artaxo P., Melillo J., Morgan M.G. 2012. Ecosystem impacts of geoengineering: a review for developing a science plan. - *AMBIO*, 41 (4): 350–369.

Sitch S., Brovkin V., von Bloh W., van Vuuren D., Eickhout B., Ganopolski A. 2005. Impacts of future land cover changes on atmospheric CO<sub>2</sub> and climate. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB2013. doi:10.1029/2004GB002311

Smith L.J., Torn M.S., 2013. Ecological limits to terrestrial biological carbon dioxide removal. — *Climatic Change*, Vol. 118, pp. 89-103. DOI 10.1007/s10584-012-0682-3

Swann A.L., Fung I.Y., Levis S., Bonan G.B., Dodey S.C., 2010. Changes in Arctic vegetation amplify high-latitude warming through the greenhouse effect. — *PNAS*, v. 107, No. 4, pp. 1295–1300.

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 2C - insights from integrated assessment modeling. — *Climatic Change*, 118: 15-27, DOI 10.1007/s10584-012-0680-5