

**Расчёт
объёмов компенсации воздействия на окружающую
среду, путём мероприятий по лесовосстановлению,
реализованных в рамках договора № 2/АМО от
17.08.2021г. в осенний период 2021 года.**

Введение

В связи с постоянно усиливающимся антропогенным изменением окружающей среды, а также возросшей актуальностью проблем изменения климата, одной из ключевых проблем экологической науки стал поиск единого показателя, способного измерить как объёмы негативного воздействия на окружающую среду, в чём бы они не выражались, так и результаты усилий, направленных на минимизацию и компенсацию ущерба, причинённого таким воздействием. Этот показатель должен обладать рядом свойств, таких как измеримость, сохранение репрезентативности для оценки процессов в различных условиях (географических, климатических), свободная конвертация в показатели, количественно оценивающие всевозможные антропогенные нагрузки и меры по их снижению.

Наиболее востребованным и широко применяемым в этом отношении показателем на данный момент считается углеродный баланс – совокупность потоков углерода между природными и искусственными резервуарами в геохимическом цикле. Важнейшим углеродным резервуаром, оказывающим глобальное воздействие на экосистемы, природные процессы и хозяйственную деятельность человека, является атмосфера Земли. Углеродный баланс атмосферы в новейшее время является положительным: количество углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4) в ней повышаются, более того это повышение скачкообразно и имеет тенденцию к усилению [1], [2]. Стремительное увеличение концентраций CO_2 и CH_4 связано, в первую очередь, с антропогенными выбросами при сжигании ископаемого топлива, распашке земель и обезлесении [3], деградации лесов (хозяйственном освоении малонарушенных лесных территорий), лесопользовании на мерзлотных почвах, лесных пожарах и пр. Оба названных газа относятся к парниковым и антропогенное повышение их концентрации в атмосфере является причиной климатических изменений, являющихся угрозой для стабильности окружающей среды, человечества и его хозяйственной деятельности/ Поскольку концентрация CO_2 в атмосфере выше, а также антропогенные выбросы больше, в расчётах для решения общих задач часто учитывают CH_4 в эквиваленте углекислого газа, а в самом общем виде оба соединения конвертируются в чистый углерод.

При этом масштаб воздействий, связанных с выбросами углерода колоссален: «углеродное загрязнение» является самым сильным фактором антропогенного воздействия на окружающую среду (как в абсолютных величинах, так и по масштабам последствий), воздействие углеродной эмиссии глобально и сказывается на всех биогеоценозах планеты, углерод

¹ Contributions to accelerating atmospheric CO_2 growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. Josep G. Canadell; et al., – PNAS, 2007.

² A 40-million-year history of atmospheric CO_2 . Zhang, Yi Ge; et al., – Philosophical Transactions of the Royal Society, 2013.

³ IPCC Fourth Assessment Report, Working Group I Report «The Physical Science Basis», Section 7.3.3.1.5.

выбрасывается в атмосферу на всех этапах производства и потребления продуктов и услуг.

Исходя из этого, для количественной оценки воздействия какой-либо деятельности на углеродный баланс, а через него – на окружающую среду, рассчитывается углеродный след, как количество CO₂ и CH₄ эмитированных при осуществлении этой деятельности, приведённых к углеродному эквиваленту. Владея информацией об углеродном следе конкретного вида деятельности, можно эффективно реализовать комплекс мер по его снижению или компенсации. Эти действия приведут к снижению или полной нейтрализации негативных последствий деятельности для окружающей среды, через смещение углеродного баланса.

Таким образом очевидна необходимость также выражать оценку результатов мер, направленных на компенсацию воздействия на окружающую среду, в углеродном эквиваленте. Это не вызывает осложнений, поскольку углерод, являясь основным компонентом живых систем и имея активный геохимический цикл, будет динамически переходить между резервуарами в ответ на реализуемые мероприятия.

Одной из эффективных мер по компенсации углеродного следа является лесовосстановление. Углерод, являясь каркасным элементом органического вещества накапливается вместе с биомассой живого сообщества. Среди наземных экосистем наибольшей биологической продуктивностью обладают леса, следовательно углеродные резервуары лесов также являются самыми большими на суше. В процессе роста деревья (и другие растения лесов, хотя и в меньших абсолютных количествах) депонируют углерод в виде фитомассы. Углерод изымается таким образом из атмосферы, в значительной степени – на период жизни организма, что для деревьев составляет десятки и сотни лет. Однако углерод не будет полностью возвращён в атмосферу и после гибели древостоя. Органические вещества опада, постепенно образующегося в течение жизненного цикла насаждения, погибших деревьев, а также все прочие органические остатки будут частично накапливаться, переходя в органическое вещество лесной подстилки и почвы. В этом резервуаре может оставаться до 46% всего углерода, накопленного насаждением на протяжении жизни [4]. Описанный процесс захоронения углерода достигает наибольшего развития в бореальных лесах, где углерод может накапливаться в торфянистых почвах тысячелетиями [5].

Итак, леса способны как к долгосрочному, но временному изъятию углерода из атмосферы, так и к его накоплению на более значительный срок, что позволяет одновременно уменьшать интенсивность общего уровня антропогенной нагрузки и способствовать его сокращению. Следовательно, лесовосстановление и сохранение лесных ландшафтов, предотвращение

⁴ Global Forest Resources Assessment – FAO, 2010

⁵ Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. Tarnocai et al., – Global Biogeochemical Cycles, 23(2),2009.

деградации лесов являются эффективной мерой компенсации углеродного следа и антропогенных воздействий, приведенных к углеродному эквиваленту. Вместе с этим, огромное разнообразие лесов, как экосистемное, так и ландшафтное, обуславливает неоднородность накопления углерода в различных резервуарах лесных сообществ, что обусловлено различными внешними условиями. Температура, количество осадков, физический и химический состав почвы влияют как на скорость роста насаждений и их биологическую продуктивность, так и на условия накопления углерода лесной подстилкой и почвой. В свою очередь породный состав и густота лесных культур, технология посадки и выращивания определяют объём депонирования углерода в фитомассе. Многообразие возможных сочетаний этих факторов определяет необходимость информационно-аналитической оценки бюджета углерода каждого лесного насаждения на локальном уровне. То есть для проекта, ставящего своей целью компенсацию воздействия на окружающую среду посредством лесовосстановления важно произвести оценку объёма накопления углерода в каждом конкретном насаждении.

Методика оценки накопления углерода в результате проведения мероприятий по лесовосстановлению

Для количественной оценки результативности мероприятий по компенсации воздействий на окружающую среду применяется Методика информационно-аналитической оценки бюджета углерода лесных насаждений на локальном уровне [6], разработанная Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук (ЦЭПЛ РАН).

Согласно данной методике накопления углерода, учитываются по 4 резервуарам (пулам) углерода: живой фитомассы, мертвой древесины, подстилки и почвы согласно методическим рекомендациям Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [7].

По отношению к пулам подстилки и почвы использована методология МГЭИК, предлагающая оценивать изменения в запасах углерода этих пулов при переходе от одного режима управления к другому [7]. Предполагается, что запасы подстилки до лесовосстановления равны нулю, а время достижения стабильного запаса подстилки в лесном насаждении составляет 20 лет [8].

Объектом оценки служит отдельное насаждение, для которого учитывается следующая информация: площадь (га), породный состав, возраст древостоя (лет). Для каждой составляющей породы учитываются сведения о

⁶ Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н. Информационно-аналитическая оценка бюджета углерода лесных насаждений на локальном уровне. Версия 1.1. М.: ЦЭПЛ РАН, 2019. <http://old.cepl.rssi.ru/local.htm>

⁷ Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. МГЭИК, 2003.

⁸ Честных О.В., Лыжин В.А., Кокшарова А.В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114-121.

средней высоте (м), среднему диаметру (см), объемному запасу древесины ($\text{м}^3/\text{га}$). Для несомкнутых лесных насаждений (со средней высотой меньше 1,3 м) вместо этого используется информация о густоте насаждения (шт./га). Необходима информация о типе почвы и времени, прошедшем с момента прекращения обработки почвы (лет).

Оценки накоплений углерода пулами фитомассы и мертвой древесины базируются на разности запасов, возникающих по мере отпада в насаждении. Основой для расчетов служат данные по динамике объемных запасов насаждений, оцениваемые в результате последовательных инвентаризаций. Поскольку реальная инвентаризация деревьев на всех площадях осложнена в связи с малым возрастом и по ряду других причин, которые будут изложены ниже, используются данные о динамике запасов насаждений, взятые из региональных таблиц хода роста, учитывающих местные особенности развития древостоев и технологических подходов к созданию лесных культур. Этот вариант использования допускается методикой для прогнозирования накопления углерода, что и является основной целью данной работы. При отсутствии региональных таблиц возможно использование обобщенных таблиц хода роста лесных насаждений. Для возрастов насаждений, превышающих стартовый возраст таблицы хода роста, используется линейная интерполяция. Ввиду нелинейности динамики запасов насаждений, наиболее явно проявляющейся в младших возрастах, для возрастов, меньших стартового возраста таблицы хода роста, используется линейная экстраполяция от стартового значения до 0 для высоты, диаметра и густоты насаждений.

Алгоритм расчета поглощения углерода при создании лесных насаждений включает в себя следующие этапы:

1. Запас углерода в фитомассе породы k определяется по формуле:

$$CPh_k = 0,5 M_k D_k BEF_k (1+R_k)$$

где:

CPh_k – запас углерода фитомассы древесной породы k , т С/га,

M_k – запас древесной породы k , $\text{м}^3/\text{га}$;

D_k – конверсионный коэффициент запаса древесины породы k в фитомассу ствола, $\text{т} \times \text{м}^{-3}$;

BEF_k – фактор расширения биомассы для породы k , безразмерен;

R_k – отношение подземной биомассы к надземной для породы k , безразмерно;

0,5 – коэффициент пересчета из органического вещества биомассы в углерод.

2. Запас углерода фитомассы в насаждении определяется по формуле:

$$CPhS = \sum (P_k CPh_k) / 10$$

где:

$CPhS$ – запас углерода фитомассы насаждения, т С/га;

P_k – доля породы k в составе, число единиц из 10;
 CPh_k – запас углерода фитомассы древесной породы k , т С/га.

3. Бюджет углерода по пулу фитомассы насаждения определяется по формуле:

$$BCPhS_i = CPhS_i - CphS_{i-1}$$

где:

$BCPhS_i$ – бюджет углерода по пулу фитомассы насаждения за год i , $\frac{\text{т С/га}}{\text{год}}$

$CPhS_i$ – запас углерода фитомассы насаждения в году i , т С/га;

$CphS_{i-1}$ – запас углерода фитомассы насаждения в предыдущем году $i-1$, т С/га.

Для первого года существования насаждения предшествующие накопления углерода фитомассы считаются равными нулю.

4. Запас углерода в мертвой древесине породы k в год i определяется по формуле:

$$CD_{ki} = CPh_{ki} KD_{ki}$$

где:

CD_{ki} – запас углерода мертвой древесины породы k в году i , т С/га;

CPh_{ki} – запас углерода фитомассы породы k в году i , т С/га;

KD_{ki} – конверсионный коэффициент для расчета запаса углерода мертвой древесины по запасу углерода фитомассы, безразмерен.

5. Запас углерода мертвой древесины в насаждении в год i определяется по формуле:

$$CDS_i = \sum (P_k CD_{ki})/10$$

где:

CDS_i – запас углерода мертвой древесины насаждения в году i , т С/га;

P_k – доля породы k в составе, число единиц из 10;

CD_{ki} – запас углерода мертвой древесины породы k в году i , т С/га.

6. Бюджет углерода по пулу мертвой древесины насаждения определяется по формуле:

$$BCDS_i = CDS_i - CDS_{i-1}$$

где:

$BCDS_i$ – бюджет углерода по пулу мертвой древесины насаждения за год i , $\frac{\text{т С/га}}{\text{год}}$;

CDS_i – запас углерода мертвой древесины насаждения в году i , т С/га;

CDS_{i-1} – запас углерода мертвой древесины насаждения в предыдущем году $i-1$, т С/га.

Для первого года существования насаждения предшествующие накопления углерода фитомассы считаются равными нулю.

7. Бюджет углерода по пулу подстилки оценивается лишь для первых 20 лет существования насаждения. В последующие годы поглощение углерода пулом подстилки считается равным нулю. Бюджет углерода по пулу подстилки в любой из 20 первых лет существования насаждения определяется:

$$BLS = \Sigma (P_k BL_k/10)$$

где:

BLS – бюджет углерода по пулу подстилки в насаждении, $\frac{т С/га}{год}$;

P_k – доля породы k в составе, число единиц из 10;

BL_k – величина поглощения углерода пулом подстилки для породы k , $\frac{т С/га}{год}$.

8. Бюджет углерода по пулу почвы определяется по формуле:

$$BS_i = a_j e^{-b_j(i+t)}$$

где:

BS_i – поглощение углерода почвой при возрасте насаждения i , $\frac{т С/га}{год}$;

t – время, прошедшее с момента прекращения пахотной обработки до момента посадки насаждения, лет.

a_j – параметр a уравнения для расчета поглощения углерода типом почвы j ;

b_j – параметр b уравнения для расчета поглощения углерода типом почвы j .

9. Бюджет углерода по всем пулам насаждения для года i определяется по формуле:

$$BC_i = BCPhS_i + BDS_i + BLS + BS_i$$

где:

BC_i – бюджет углерода по всем пулам насаждения за год i , $\frac{т С/га}{год}$;

$BCPhS_i$ – бюджет углерода по пулу фитомассы насаждения за год i , $\frac{т С/га}{год}$;

BDS_i – бюджет углерода по пулу мертвой древесины насаждения за год i , $\frac{т С/га}{год}$;

BLS – бюджет углерода по пулу подстилки в насаждении, $\frac{т С/га}{год}$;

BS_i – поглощение углерода почвой за год i , $\frac{т С/га}{год}$.

10. Расчет поглощения углерода для всей площади созданного насаждения проводится по формуле:

$$BCT_i = S BC_i$$

где:

BCT_i – бюджет углерода по всем пулам для всей площади насаждения за год i , $т С/год$;

S – площадь насаждения, га;

BC_i – бюджет углерода по всем пулам насаждения за год i , $\frac{\text{т С/га}}{\text{год}}$.

11. Конвертация поглощения углерода в эквивалент CO_2 осуществляется по формуле:

$$BCO_2 = \frac{BCST_i \times 44}{12}$$

где:

BCO_2 – накопление углерода в фитомассе в пересчете на углекислый газ, т CO_2

$BCST_i$ – бюджет углерода по всем пулам для всей площади насаждения за год i , т С/год;

44 – молярный вес CO_2 , г/моль;

12 – молярный вес С, г/моль.

Данная методика является основой для программного обеспечения [9], позволяющего выполнять автоматизированные расчёты при вводе всех необходимых данных. Это программное обеспечение использовалось в дальнейшем для автоматизации обработки данных.

Прогноз накопления углерода в созданных насаждениях в рамках мероприятий по компенсации воздействий на окружающую среду

Далее, в соответствии с приведенной методикой, будет рассмотрена результативность мероприятий по лесовосстановлению, реализованных в рамках договора № 2/АМО от 17.08.2021г. в осенний период 2021 года. Итогом оценки является прогноз накопления углерода в фитомассе лесных насаждений в пересчёте на объём CO_2 с момента создания культур до достижения ими возраста 7. Такой временной интервал выбран для прогноза, поскольку лишь при достижении указанного возраста процесс восстановления лесной среды на безлесном участке можно считать произошедшим (для сосны кедровой сибирской этот срок выше, но в целях сохранения единообразия данных применяется общий срок прогнозирования).

В рамках данной работы будет использоваться прогноз накопления углерода только в пуле фитомассы созданных насаждений, поскольку в ранние годы жизни леса не происходит значительного накопления мёртвой древесины, а оценка пулов подстилки и почвы в прогнозном режиме имеет низкую точность, поскольку основывается исключительно на самых общих закономерностях накопления углерода почвами разных типов почв и не предусматривает возможности учёта локальных факторов.

В рамках проекта проведено лесовосстановление на площади 30,4 га в 2 регионах России, относящихся к 2 лесным районам, при этом созданы лесные

⁹ <http://old.cepl.rssi.ru/carbondoc/local/loc2.xls>

культуры 2 пород. Всего высажено 104 500 саженцев. Распределение площадей по указанным признакам приведено в таблице (Табл. 1).

№	Регион	Лесничество	Уч. лесничество	Лесной район	Кв.	Выд.	Пл., га	Порода	Кол-во, шт.
1	Республика Алтай	Турочакское	Иогачское	Алтае-Саянский горно-таежный	41	6	18,5	Кедр	57350
2	Республика Алтай	Турочакское	Иогачское	Алтае-Саянский горно-таежный	11	19	6,5	Кедр	20150
3	Московская область	Орехово-Зуевское	Ликинское	Хвойно-широколиственный (смешанных) лесов европейской части РФ	47	2;5;6;12;13;21	5,4	Сосна	27000
Всего:							30,4		104 500

Таблица 1. Распределение площадей, на которых проведено лесовосстановление, по местоположению, лесному районированию, породам и количеству высаженных саженцев.

Лесные культуры сосны обыкновенной в Московской области

Данные о динамике запасов насаждений сосны в Московской области получены из таблицы хода роста полных (нормальных) сосновых древостоев [10]. Общая площадь лесных культур – 5,4 га, густота лесных культур – 5,0 тыс.шт./га, почвы на участках лесных культур – серые лесные, бонитет насаждения – II, возраст отнесения к землям, занятыми лесными насаждениями - 7 лет.

Накопление углерода в фитомассе к возрасту 7 лет, в пересчете на углекислый газ, т CO₂ составит 186,8 т. Прогноз накопления углерода в фитомассе приведён в диаграмме (Рис. 1) и таблице (Табл. 2).

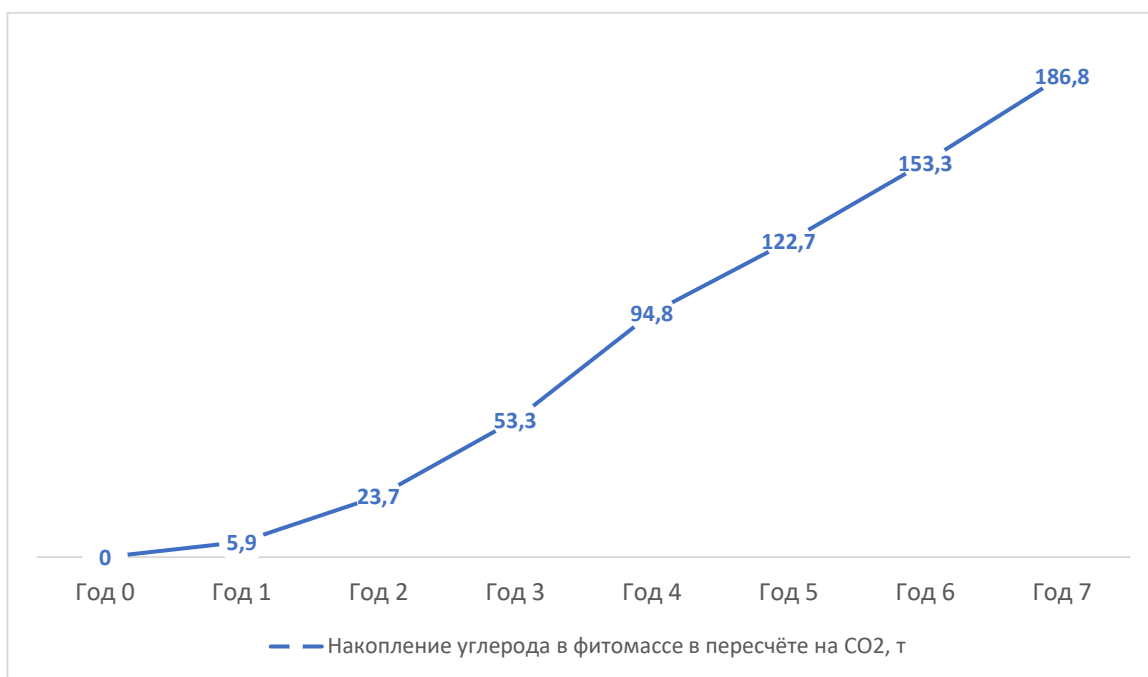


Рисунок 1. Прогноз накопления углерода в фитомассе сосновых насаждений в Московской области по годам.

Год	Накопление С в фитомассе, т	Эквивалент CO ₂ , т
0	0	0,0
1	1,61	5,9
2	6,46	23,7
3	14,54	53,3
4	25,86	94,8
5	33,46	122,7
6	41,82	153,3
7	50,94	186,8

Таблица 2. Прогноз накопления углерода в фитомассе сосновых насаждений в Московской области по годам.

¹⁰ Загребев В.В. Географические закономерности роста и продуктивности древостоев. М.: Лесная промышленность, 1978.

Лесные культуры сосны кедровой сибирской (кедра) в Республике Алтай

Данные о динамике запасов насаждений сосны кедровой сибирской в Республике Алтай получены из таблицы хода роста полных (нормальных) кедровых древостоев [11]. Общая площадь лесных культур – 25,0 га, густота лесных культур – 3,1 тыс.шт./га, почвы на участках лесных культур – серые лесные, бонитет насаждения – II, возраст отнесения к землям, занятыми лесными насаждениями – 10 лет.

Накопление углерода в фитомассе к возрасту 7 лет, в пересчете на углекислый газ, т CO₂ составит 299,2 т. Прогноз накопления углерода в фитомассе приведён в диаграмме (Рис. 2) и таблице (Табл. 3).

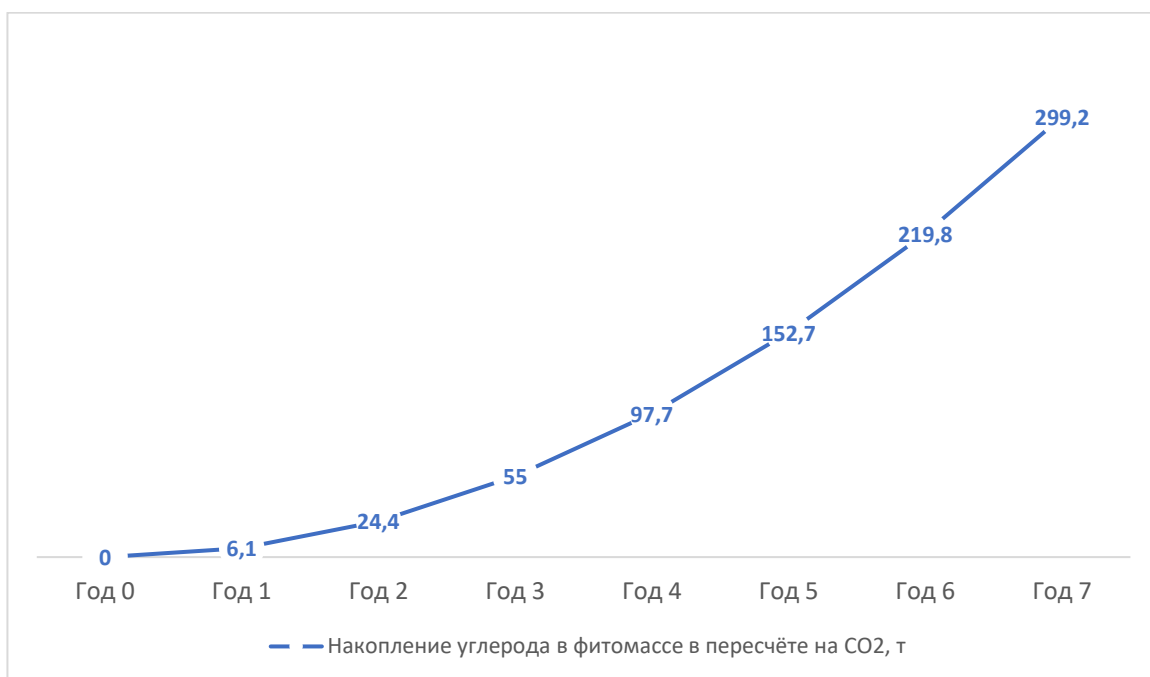


Рисунок 2. Прогноз накопления углерода в фитомассе насаждений сосны кедровой сибирской по годам.

Год	Накопление С в фитомассе, т	Эквивалент CO ₂ , т
0	0	0,0
1	1,66	6,1
2	6,66	24,4
3	14,98	55,0
4	26,64	97,7
5	41,63	152,7
6	59,95	219,8
7	81,60	299,2

Таблица 3. Прогноз накопления углерода в фитомассе насаждений сосны кедровой сибирской по годам.

¹¹ Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Издание 2-е, доп. - М: Федеральное агентство лесного хозяйства, 2008. 886 с.

Общий прогноз

Общий объём накопленного углерода в фитомассе к возрасту 7 лет, в пересчете на углекислый газ, т CO₂ составит 486 т по всем площадям, охваченным лесовосстановлением. Общая площадь лесных культур – 30,4 га, средняя плотность лесных культур – 3,42 тыс.шт./га. Прогноз накопления углерода в фитомассе приведён в диаграмме (Рис. 3) и таблице (Табл. 4).

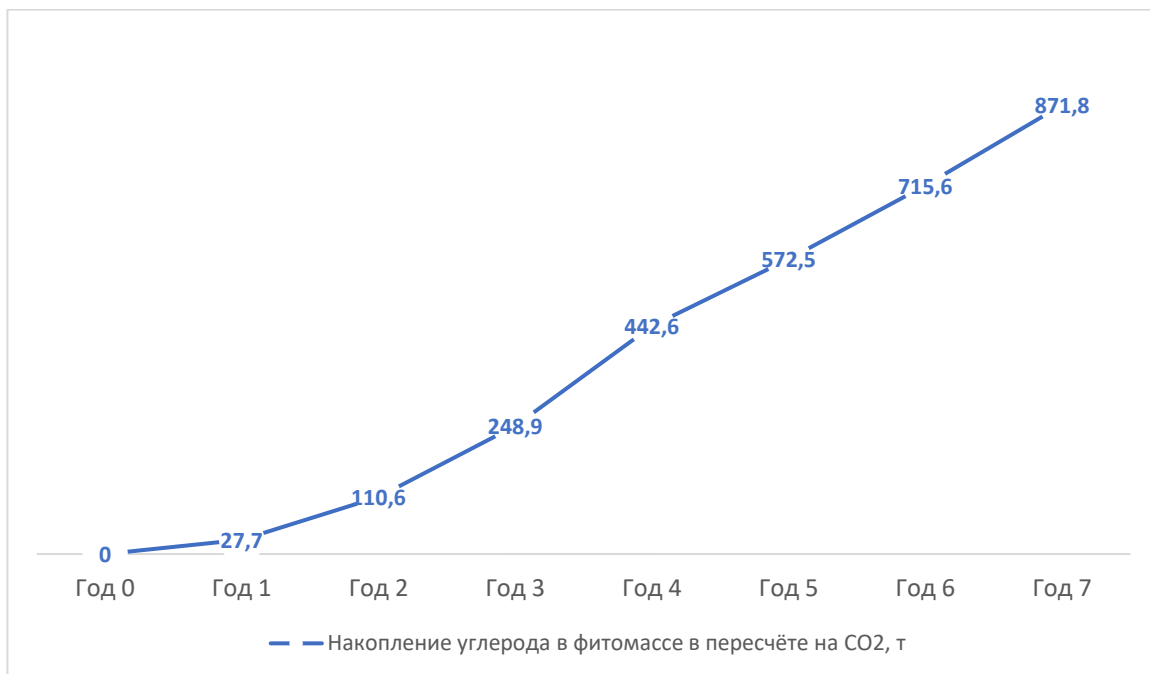


Рисунок 6. Прогноз накопления углерода в фитомассе всех созданных насаждений по годам.

Год	Накопление С в фитомассе, т	Эквивалент CO ₂ , т
0	0	0,0
1	3,28	27,7
2	13,12	110,6
3	29,53	248,9
4	52,50	442,6
5	75,09	572,5
6	101,77	715,6
7	132,55	871,8

Таблица 7. Прогноз накопления углерода в фитомассе всех созданных насаждений по годам.

В среднем, объём CO₂, депонированного в 1 га насаждений к возрасту 7 лет, составит 28,7 т.

Ограничения прогнозирования

Несмотря на использование в данном прогнозе проверенной методики, имеется ряд ограничений, связанных со спецификой самой методики и проекта:

1. Точность прогнозного варианта методики зависит от корректного выбора таблиц хода роста для ретроспективного анализа накопления биомассы в насаждении с первого года жизни. Даже при использовании региональных таблиц хода роста невозможно добиться точного соответствия с реальным развитием насаждения в конкретных условиях участка, на котором созданы лесные культуры. Также следует отметить, что актуальность таблиц хода роста на данный момент дискуссионна – данные, приведённые в таблицах, собраны 60-40 лет назад и могут быть неточны в результате климатических изменений.

2. Для высокоточной оценки объёма углерода, депонированного в фитомассе насаждения необходимо проведение измерений показателей насаждений (диаметр стволов, высота деревьев, количество деревьев) на пробных площадях на каждом участке. При этом для деревьев в первые годы жизни недостаточно и этих показателей в виду возможных значительных отличий по объёму депонированного углерода между растениями с одними показателями. Для насаждений младше 5 лет точно измерить этот объём можно лишь методом взвешивания, который предполагает выкапывание растений на пробной площадке.

Вместе с тем прогнозный вариант анализа допускается использованной методикой и опирается на масштабные данные таблиц ход роста, хорошо зарекомендовавших себя в лесоводственной практике. Предлагается считать дополнительным эффект, оказанный в результате депонирования углерода в лесной подстилке и почве созданных насаждений, поскольку ряд других положительных эффектов проекта (сохранение местообитаний, регулирование водного режима, вклад в чистоту воздуха и воды, создание комфортной среды для людей и прочее) не могут быть оценены в виде объёма CO₂ в рамках данного проекта.