

ОЦЕНКА ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В НАРУШЕННЫХ СИБИРСКИМ ШЕЛКОПРЯДОМ ТЕМНОХВОЙНЫХ ГОРНО-ТАЕЖНЫХ ЛЕСАХ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

А.П. Мохирев[✉], С.М. Сультсон, П.В. Михайлов,
О.А. Слинкина, Н.Н. Кулакова, С.С. Кулаков,
Д.А. Демидко, Н.П. Мельниченко, А.А. Горошко

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», Россия, 660037, г. Красноярск, ул. Проспект имени газеты «Красноярский рабочий», д. 31

ale-mokhirev@yandex.ru

Представлены результаты полевых исследований по оценке запаса углерода в мертвой древесине темнохвойных лесных формаций, поврежденных в результате массовой дефолиации гусеницами сибирского шелкопряда. Проведено натурное обследование в границах Алтае-Саянского горно-таежного лесного района (Ирбейское лесничество Красноярского края). По наблюдениям установлено, что после двухлетнего периода, прошедшего с момента подавления вспышки размножения сибирского шелкопряда, наблюдается массовое усыхание темнохвойных лесов, обусловленное крайне низкой устойчивостью к потере хвои (при дефолиации от 25 % и выше древостой гибнут практически полностью). Определен отпад древостоя на момент исследования — в среднем 64 ± 25 %. Получены результаты по запасам накопления крупных древесных остатков (отпада древостоя, детрита) с последующим определением запасов углерода в мертвой древесине шелкопрядников. Выполнен анализ структуры запасов валежной древесины по стадиям разложения, который показал начало динамичного процесса появления свежего валежа с переходом во вторую стадию. Получены данные о среднем запасе углерода мертвой древесины в поврежденных участках — $16,6 \pm 7,4$ т/га с очевидным увеличением ее количества на перспективу. Полученные результаты могут служить основой для дальнейшего изучения динамики отпада и оценки баланса углерода в древостоях, претерпевших масштабные нарушения от воздействия фитофагов, что на региональном уровне важно для определения параметров эмиссии углерода в момент нарушения лесных экосистем и в последующие периоды.

Ключевые слова: сибирский шелкопряд, темнохвойные лесные формации, отпад древостоя, детрит, разложение древесины, запас углерода

Ссылка для цитирования: Мохирев А.П., Сультсон С.М., Михайлов П.В., Слинкина О.А., Кулакова Н.Н., Кулаков С.С., Демидко Д.А., Мельниченко Н.П., Горошко А.А. Оценка запасов углерода в нарушенных сибирским шелкопрядом темнохвойных горно-таежных лесах Красноярского края // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 18–30. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-18-30

Изменения в структуре древостоя, вызванные нарушениями или старением деревьев доминирующей породы, влияют на углеродный баланс древостоев за счет снижения фотосинтеза и усиления гетеротрофного дыхания [1]. Углерод, хранящийся в валежной (мертвой) древесине, составляет примерно 8 % мировых запасов углерода в лесных экосистемах. Объем валежной древесины в лесах зависит от факторов прироста (нарушений, разреживания, старения) и факторов истощения (заготовки древесины и разложения) [2]. При этом мелкомасштабные нарушения не обязательно приводят к тому, что лес становится источником углерода. В зависимости от вида деревьев и зоны растительности разложение валежной древесины может длиться десятилетиями, тогда как быстрое естественное возобновление или обильный подрост могут компенсировать потерю доминирующих деревьев и смягчить повышенные эмиссии углерода [2, 3].

На процесс разложения валежной древесины значительное влияние оказывают климатические особенности, при этом такие редуценты, как микроорганизмы и насекомые, вносят свой вклад в изменение скорости разложения. В глобальном масштабе вклад насекомых в разложение валежной древесины и эмиссию углерода остается недостаточно изученным [4].

Для территорий умеренных и бореальных лесов характерно слабое положительное и отрицательное влияние насекомых (средняя потеря биомассы 0,9 % и –0,1 % в год соответственно). В тропических лесах насекомые ускоряют разложение валежной древесины, включая прямое потребление насекомыми древесины и косвенное воздействие через взаимодействие с микроорганизмами (средняя потеря биомассы составляет 3,9 % в год). В глобальном масштабе насекомые способны увеличить эмиссию углерода валежной древесиной на 29 %, что свидетельствует о важности учета их значения в глобальном углеродном цикле [4–6].

При естественных процессах валежник является постоянным структурным компонентом древостоев. В условиях фонового отпада насаждения могут, в конечном итоге, достигнуть устойчивого состояния, при котором объем валежной древесины будет изменяться в пределах равновесного состояния. Однако во многих лесах объем и качество валежной древесины более изменчивы вследствие повторяющихся нарушений. Эта изменчивость, фоновый отпад и варьирование скорости разложения древесины определяют динамику и доступность валежной древесины как среды обитания и стока углерода в экосистемах бореальных хвойных лесов.

Объем валежной древесины зависит не только от продуктивности участка, но и от стадии развития древостоя, а также промежутков между эпизодами массового усыхания деревьев, вызванных внешними и (или) внутренними факторами (например, от воздействия насекомых, от засухи) [7–9]. При отсутствии крупных нарушений позднесукцессионные древостои могут перейти в квазиравновесную стадию, в которой количество и качество валежной древесины можно рассматривать как относительно стабильные компоненты структуры древостоя. В бореальных лесах развитие такого состояния требует довольно продолжительного времени, и во многих типах леса квазиравновесная стадия, по-видимому, не наступит никогда, поскольку объем и качество валежной древесины сильно изменяются по причине возникновения нарушений [7].

Детрит в виде надземных крупных древесных остатков (КДО — англ. Coarse Woody Debris) представляет собой переходную стадию цикла углерода, когда углерод живой биомассы переходит в атмосферу или лесную подстилку в ходе процесса разложения. Это важный резервуар углерода в лесных экосистемах, который связывает потоки вещества между растительной массой и биокостной почвой [10].

Надземные грубые древесные остатки включают в себя сухостойные деревья (стоящие или зависшие на соседних мертвые деревья), валеж (частично или полностью погребенные в почвенном слое древесные стволы), пни и корни погибших по разным причинам деревьев, опавшие древесные фрагменты живых и сухостойных деревьев, массовый послепожарный, ветровальный валеж, порубочные остатки на вырубках [10]. На валеж приходится примерно 20 % общего углерода экосистемы в старовозрастных и вторичных лесах [11].

Эмпирические данные о содержании углерода в различных фракциях древесного отпада приведены в работе [1], авторами которой установлено, что стволовая древесина содержит 63 % углерода

древесного отпада, кора — 23 %, на корни и ветки приходится по 6 %, а в тонких тканях содержится 2 % общего углерода мертвой древесины. На содержание углерода также влияет положение древесных остатков: в валеже сосредоточено 78 % общего углерода, в то время как на сухостой приходится только 22 %. Также установлено, что в сильноразложившейся древесине содержится меньшее количество углерода, чем в древесных остатках низших классов разложения [1].

В целом основными предикторами интенсивности разложения мортмассы являются качество древесного субстрата (породный состав насаждения и положение валежника (контакт с землей)), количество и активность главных деструкторов субстрата, внешние абиотические условия, время разложения [2, 10].

Потеря массы древесины за год при разложении максимальна при коэффициенте увлажнения H , приближающемся к единице или от 0,9 до 2,1. Это оптимальный диапазон, необходимый для жизнедеятельности бактерий и грибов. Скорость разложения снижается при $H < 0,6$ и $H > 4$ [10].

В первый год разложение происходит быстрее, чем в последующее время, что связано с приростом биомассы грибов [10]. Основным фактором в процессе разложения древесных остатков является микробное дыхание, которое составляет 76 % потерь углерода из грубых древесных остатков [11].

На скорость разложения также влияет диаметр остатков стволов и ветвей (с корой или без нее). Скорость потери массы древесины ветвей, корней и стволов снижается с увеличением их диаметра [10].

В порядке убывания значимости факторы, влияющие на скорость разложения детрита, представлены диаметром древесных остатков, режимом увлажнения, температурой воздуха и породой дерева [12].

Для расчета динамики накопления углерода в валежной древесине, исходя из количественной оценки запасов углерода в древесных остатках, перспективными являются методические подходы, позволяющие строить имитационные модели, учитывающие динамику накопления и разложения древесных остатков (с упором на эмпирические конструкции моделей) [11]. Однако для построения прогнозных моделей необходимы знания, идентифицирующие особенности формирования детрита в различных условиях, позволяющих создать основу для оценки интенсивности разложения древесины и влияния данных процессов на объем углерода на региональном уровне. При этом отдельно следует рассматривать площади нарушенных лесов, претерпевающих интенсивные процессы отмирания деревьев, и



Рис. 1. Местоположение исследуемой территории
Fig. 1. Location of the study area

насаждений развивающихся по естественному циклу.

В сибирских регионах в настоящее время сохраняется проблема масштабной гибели темнохвойных лесов в результате массового размножения сибирского шелкопряда. Ситуация распространена во всех субъектах, в которых данный фитофаг является фоновым вредителем. Периоды массового размножения носят циклический характер и повторяются ориентировочно через каждые 10...15 лет. Вследствие воздействия вредителя формируются большие площади (десятки тысяч гектар) усыхающих темнохвойных древостоев, так называемых шелкопрядников, в которых концентрируются значительные объемы мертвой древесины, что отрицательно сказывается на углеродном балансе как регионального, так и глобального уровней (снижается функциональность живых насаждений, повышается вероятность возникновения пожаров).

Интенсивность формирования отпада в существенном масштабе и процессов разложения мортмассы на таких участках изучена недостаточно, что затрудняет проведение оценки запасов углерода, его депонирования и эмиссионных процессов в таких древостоях.

Цель работы

Цель работы — изучение объемов накопления крупных древесных остатков (отпада древостоя, детрита), определение запасов углерода в мертвой

древесине, пораженной сибирским шелкопрядом, образующейся в начальные периоды после вспышки размножения сибирского шелкопряда.

Материалы и методы

В рамках поставленной задачи проведено натурное обследование темнохвойных лесных формаций, поврежденных в результате массовой дефолиации гусеницами сибирского шелкопряда (вспышка размножения 2018–2020 гг.).

Территориально объект изучения находится в пределах Ирбейского лесничества Красноярского края (рис. 1). Ландшафтный комплекс характеризуется среднегорным рельефом и относится к Южно-Сибирской горной лесорастительной зоне, Алтае-Саянскому горно-таежному лесному району.

Переход популяции в фазу вспышки размножения произошел весной 2019 г., развитию чего способствовала недостаточная влагообеспеченность в продолжение всего вегетационного периода 2015 г., в июне, июле и сентябре 2016 г., на фоне повышенных среднесуточных температур [13]. По данным дистанционного зондирования на 10.08.2020 г. общая площадь поврежденных участков (дефолиация кроны на 75 % и более) составила 28 442 га.

Основной кормовой культурой сибирского шелкопряда в данном районе являются пихта сибирская (*Abies sibirica* L.) и сосна кедровая сибирская — кедр (*Pinus sibirica* Du Tour).

Региональная особенность темнохвойных формаций выражается в господстве зеленомошной группы, представленной набором типов леса [14]. Около половины насаждений относится к черничной и бадановой группам типов леса — 41,3 %, в основном представленным кедрово-пихтовыми древостоями (74,5 % общей площади черничной и бадановой групп типов леса). На разнотравно-зеленомошную группу типов леса приходится 28,1 %. Сосняки зеленомошные отмечаются фрагментарно и локально. Лиственничники горнотаежные не имеют широкого распространения, располагаясь, как и ельники, исключительно в ложбинах и по долинам рек. По возрастной структуре преобладают спелые и перестойные древостои. Средняя относительная полнота 0,5...0,7. В целом доля таких древостоев составляет более 54,6 % их общей площади. Высокополнотные древостои представлены преимущественно кедром. Условия местопроизрастания лесов на территории характеризуются в среднем III–IV классами бонитета (94,6 %). Высокобонитетные насаждения представлены березовыми и осиновыми древостоями, более 85,0 % низкобонитетных лесов относятся к кедрово-пихтовым древостоям долгомошного и зеленомошного типов. Отдельные участки насаждений представлены высокобонитетными березовыми и осиновыми древостоями травяной группы типов леса.

При проведении полевых исследований за основу приняты ранее разработанные и ставшие широко известными приемы и методы мониторинга, которые редактировались с учетом специфики выполнения работ в древостоях, поврежденных сибирским шелкопрядом в результате его массового размножения.

За основу перечета деревьев на нарушенных участках леса взята оптимизированная методика, разработанная научными сотрудниками Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН совместно с Институтом биогеохимии Макса Планка (г. Йена, Германия) [15]. Пробные площади закладывались из трех концентрических кругов в целях полного перечета деревьев в них в зависимости от диаметра ствола дерева: диаметр первого концентрического круга — 3,5 м, второго — 7,5 м, третьего — 15,0 м.

На пробных площадях проведены таксация древесного яруса, учет подроста и подлеска, определен состав живого напочвенного покрова и КДО.

Крупные древесные остатки определялись как все надземные древесные остатки диаметром не менее 5 см в тонком конце. Структурно КДО подразделены на три основные группы:

1) сухостой — отмершие, но не упавшие на поверхность лесной подстилки дерева (стоя-

щие на корню или зависшие в кронах соседних деревьев);

2) валежник — в разной степени разложившиеся деревья или их части, расположенные на поверхности и в толще лесной подстилки;

3) пни (высота $H = 10...30$ см) и части сухостойных деревьев без верхушки, оставшиеся на корню и возвышающиеся над поверхностью почвы на высоту слома.

При расчетах запаса валежа объемы пней были отнесены к категории «валежная древесина» и при расчетах учтены в общем значении.

Разбивка пробной площади на местности осуществлялась по сторонам света. Перечет деревьев в первом концентрическом круге пробной площади — сплошной. Минимальная длина окружности деревьев, принимаемая в перечет — 10 см. Во втором круге перечету подлежали деревья, минимальная длина окружности которых составляла 30 см. Минимальная длина окружности деревьев при перечете деревьев в третьем круге пробной площади — 60 см. При перечете древостоя для каждого дерева были определены длина окружности ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли, его максимальная высота, высота основания кроны, высота самой широкой части кроны, класс Крафта, категория технической годности, повреждения, статус дерева (живое/мертвое), причина отмирания.

Возрастная структура древостоя установлена путем отбора кернов.

На каждой пробной площади проведен сплошной учет стволового валежа и пней отдельно по породам в зависимости от его размещения в радиусе 7,5 или 15 м. Учет валежника и пней выполнен с разбиением по стадиям разложения с измерением линейных параметров. У валежника измерены длина и диаметры двух противоположных концов, у пней — с учетом высоты и двух диаметров: на высоте спила (или слома) и у шейки корня, у сухостоя — высоты и диаметра на высоте 1,3 м от поверхности земли. Разделение по классам разложения проведено по следующим признакам: 1-я стадия разложения — древесина не утратила своей твердости, на стволах сохраняются кора и ветви; 2-я — древесина частично утратила твердость, кора довольно легко отслаивается, есть крупные и мелкие ветви; 3-я — древесина почти полностью утратила свою твердость, на стволах в незначительном количестве имеются кора и крупные ветви.

Выполнена визуальная оценка живого напочвенного покрова (геоботаническое описание).

Объем крупных древесных остатков определен в соответствии с общепринятыми методами таксации [16].

Характеристика пробных площадей

Characteristics of sample areas

Но- мер проб- ной пло- щади	Шифр пробной площади	Географические координаты WGS84 EPSG: 4326		Состав древостоя	Возраст древостоя, лет	Средняя высота древостоя, м	Средний диаметр древостоя, см	Бонитет	Тип леса	Полнота	Запас, м ³ /га	Экспозиция по сторонам света	Крутизна склона, град
		широта	долгота										
1	СТ 6	55,029706	96,034790	4КЗП1С2Б	170	25	40	3	Ч	0,8	410	ЮЗ	11
2	СТ 5	55,026988	96,034302	4КЗП1С2Б	170	25	40	3	Ч	0,8	410	«←»	11
3	СТ 2	55,045299	96,033449	4К4П2Б	160	22	32	4	БД	0,7	320	Рав- нина	–
4	СТ 1	55,013966	96,034513	4КЗП2Б1Ос	170	24	40	3	Ч	0,7	340	Ю	17
5	СТ 7	55,056510	96,043426	3К6П1Б	180	22	28	4	БД	0,6	270	Рав- нина	–
6	Ирбей 80	55,025577	96,030275	5КЗП1С1Б	170	25	40	3	Ч	0,7	360	СВ	12
7	СТ 3	55,032075	96,041611	3К6П1Б+С	180	22	36	4	Ч	0,8	360	«←»	12
8	Ирбей ПВ6	55,028627	96,031833	3КЗП1С2Б1ОС	170	22	36	4	Ч	0,8	360	ЮЗ	12
9	Ирбей 100	55,044977	96,026897	3К5П2Б	150	22	28	4	БД	0,8	340	Рав- нина	–
10	Ирбей 75–100	55,049824	96,028041	6П2К2ОС	110	22	22	3	ЗМ	0,7	260	«←»	–
11	Ирбей 95	55,031191	96,035963	3К3С2П2ОС	170	22	32	4	Ч	0,8	380	«←»	–
12	СТ 4	55,033426	96,036581	3К3С2П2ОС	170	22	32	4	Ч	0,8	380	«←»	–
13	СТ 8	55,070925	96,032492	4К4П2Б	160	22	28	4	Ч	0,6	270	«←»	–
14	СТ 9	55,070119	96,029684	4К4П2Б	160	22	28	4	Ч	0,6	270	«←»	–

Примечание. Типы леса: Ч — черничниковый; БД — бадановый; ЗМ — зеленомошный.

Запасы углерода рассчитаны по конверсионно-объемному методу [17], положенному в основу приказа Минприроды РФ от 27 мая 2022 г. № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» [18]. Значение запаса углерода рассчитано как для древостоя, так и для мертвой древесины.

Исходными показателями служил запас мертвой древесины породы дерева в определенном возрастном состоянии. Запас углерода в мертвой древесине по группам возраста преобладающих пород рассчитан по формуле

$$CD_{ij} = V_{ij} \cdot KD_{ij},$$

где CD_{ij} — запас углерода в мертвой древесине насаждений группы возраста i преобладающей породы j , т;

V_{ij} — объемный запас ствольной древесины насаждений группы возраста i преобладающей породы j , м³;

KD_{ij} — конверсионный коэффициент для расчета запаса углерода в мертвой части насаждений группы возраста i преобладающей породы j , т·С/м³ [18].

Аналогичная формула была использована для расчета запаса углерода в живой части древостоя с применением соответствующих конверсионных коэффициентов (т·С/м³) для расчета запаса углерода в биомассе древостоя по объемному запасу древесины лесного насаждения [18]. Расчет запаса углерода в лесной подстилке и почве не входил в задачу исследования, поскольку натурные обследования были ориентированы преимущественно на дальнейшее применение полученных результатов по формированию процессов отпада в древостоях, поврежденных сибирским шелкопрядом, для измерений указанных параметров по данным спутниковых фотоснимков [18].

В качестве исходных данных были использованы таксационные характеристики 14 пробных площадей, из них 11 — на участках, поврежденных сибирским шелкопрядом и три контрольные пробные площади (за пределами очага повреждений) (табл. 1). Обследование проведено в июле 2022 г. В табл. 2 представлены запасы КДО, рассчитанные по данным полевых обследований. На рис. 2 приведено процентное соотношение запасов валежа, в зависимости от стадии разложения, в пределах исследуемых участков.

Таблица 2

Запасы крупных древесных остатков, по данным полевых обследований

Stocks of large woody debris, according to field survey data

Но- мер проб- ной пло- щади	Шифр проб- ной пло- щади	Стволовой запас древо- стоя, м ³ /га		Состав по породам		Запас, м ³ /га										От- пад, %		
		об- щий	в том числе жизне- способ- ных деревьев	сухой	валежная древесина	сухой по породам					валежная древесина по породам							
						все- го	П	К	Е	Б	все- го	П	К	Е	С		Б	Лц
1	СТ 6	256	102	6П4К	5К5П	154	86	68	-	-	143	47	96	-	-	-	-	60,2
2	СТ 5	226	173	7П3К	8К2П	53	41	12	-	-	55	13	42	-	-	-	-	23,5
3	СТ 2	377	228	10К	10П ед. К	149		149	-	-	97	95	2	-	-	-	-	39,5
4	СТ 1	369	43	5П4К1Е	6П3С1К+Е	326	150	127	49	-	31	20	2	1	8	-	-	88,3
5	Ирбей 80	581	138	9К1П	6К3П1Б	443	54	389	-	-	7	2	4	-	-	1	-	76,2
6	СТ 3	287	143	8К2П	10П+К+Лц	144	39	105	-	-	107	104	2	-	-	-	1	50,2
7	Ирбей ПВ6	287	198	5К5П	6К4П ед. Е	89	41	48	-	-	153	74	77	2	-	-	-	31,0
8	Ирбей 100	486	0	6К3П+Е+Б	5П2К2Б1С	486	147	296	18	25	53	29	8	-	5	10	-	100,0
9	Ирбей 75- 100	305	92	6П4Кед.Е	10П	213	141	67	5	-	68	68	-	-	-	-	-	69,8
10	Ирбей 95	414	37	5К5П	6К4П	377	191	186	-	-	227	143	84	-	-	-	-	91,1
11	СТ 4	524	129	9К1П+Е	4К4П2Е	395	101	285	9	-	90	37	34	19	-	-	-	75,4
12	СТ 7	256	233	10П	9П1Б+К	23	23	-	-	-	287	256	2	-	-	19	-	9,0
13	СТ 8	241	222	7П3К	9П1Б+Е	19	13	6	-	-	57	52	-	2	-	3	-	7,9
14	СТ 9	284	268	10П	10П+Е	16	16	-	-	-	47	46	-	1	-	-	-	5,6

Примечание. Контрольные участки: СТ 7, СТ 8, СТ 9; породы: П — пихта; К — кедр; Е — ель; Б — береза; Лц — лиственница.

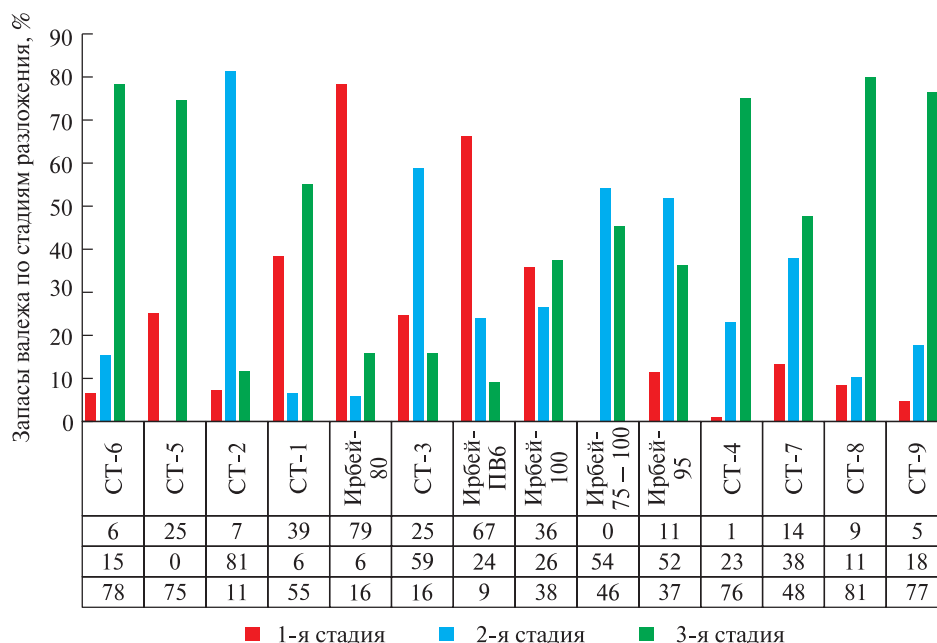


Рис. 2. Структура запасов валежа в зависимости от стадии разложения: контрольные участки: СТ 7, СТ 8, СТ 9

Fig. 2. Structure of dead wood stocks depending on the decomposition stage: control plots: СТ 7, СТ 8, СТ 9

Результаты и обсуждение

По полученным наблюдениям после двухлетнего периода с момента подавления вспышки размножения сибирского шелкопряда наблюдается массовое усыхание темнохвойных лесов. Обусловлено это тем, что темнохвойные породы крайне неустойчивы к потере хвои, и при дефолиации от 25 % и выше гибнут практически полностью. Это подтверждено во всех работах, в которых динамика отмирания исследована количественно [19–21] или даны качественные оценки [22]. По данным работы [19], отмирание завершается в течение трех лет. В целом согласуются с ними и результаты исследований в древостоях пихты сибирской с участием ели сибирской [21] — через три года после дефолиации эти породы полностью выпадают из состава древостоев. Отмирание деревьев пихты при дефолиации от 25 до 75 % варьирует примерно от 30 % [20] до 75 % [21] и продолжается, ориентировочно, спустя пять лет после повреждения [21]. При частичной дефолиации у деревьев пихты проявляются попытки восстановить крону, однако атаки стволовых вредителей заканчиваются гибелью для значительной части из них в течение нескольких лет [21, 22]. Более слабая дефолиация приводит к отмиранию в среднем 10...20 % деревьев пихты [19, 20]. Для отдельных древостоев степень усыхания этой породы может варьировать от единичных деревьев до практически полного выпадения ее из древостоя [21]. В некоторых случаях значительный отпад пихты наблюдается даже за пределами дефолированных древостоев [21], что может быть связано с повреждением их стволовыми вредителями, мигрировавшими из очагов массового размножения, которые сформировались в поврежденных сибирским шелкопрядом участках [23, 24].

Отпад древостоя на момент исследования составил в среднем 64 ± 25 % (значения варьируют в пределах от 24 до 100 %). Значительные площади представлены участками с концентрацией сухостойных деревьев пихты и кедра. Часть древостоя находится на стадии отмирания. Обилие отмирающих пихт в очагах массового размножения сибирского шелкопряда объясняет их слабое заселение стволовыми насекомыми: запас их корма слишком велик, а его качество быстро понижается. По этой причине вклад короедов и усачей в развитие начальных стадий разрушения древесины в очагах шелкопряда — минимален. На третий-четвертый год наблюдается массовый отпад коры, крупных ветвей и вершин деревьев. Отпад стволов достигает максимума еще через три — пять лет [25]. Спустя

примерно 15 лет после сильной (70...100 %) дефолиации живых деревьев пихты сибирской в очагах распространения сибирского шелкопряда не обнаружено [20].

Отмирание кедра сибирского в древостоях, где он (кедр) участвовал в составе в равных или меньших долях с пихтой, протекает менее интенсивно: даже при дефолиации 50...75 % общая доля усохших деревьев и текущего отпада сравнительно невелика. Лишь изредка текущий отпад для кедра превышает 20 %, причем в некоторых случаях гибель деревьев намного интенсивнее происходит при слабой (до 25 %) дефолиации [21]. Последнее можно предположительно связать с неблагоприятными условиями произрастания, большим возрастом или наличием дополнительных стрессов [24].

Анализ структуры запасов валежной древесины по стадиям разложения (см. рис. 2) показывает начало динамичного процесса появления свежего валежа с переходом во вторую стадию. Общей закономерности в данном соотношении не наблюдается, поскольку в настоящий момент древостой находится на начальной стадии распада, в связи с чем накопление валежника первой стадии в ближайшие два-три года будет увеличиваться. На контрольных участках в темнохвойных древостоях наблюдается противоположная ситуация, доминирует старый валеж (48...81 %), сформировавшийся в результате естественных процессов отмирания или воздействия климатических факторов (ветровалов, буреломов). Процент отпада деревьев не превысил 10 %.

По данным Ю.Н. Баранчикова, В.Д. Перевозниковой [27] спустя 10–12 лет после повреждения 60...70 % объема древесины пихты, ели и кедра относится ко II и III стадии разложения. Влажность сухостойной древесины ниже, чем у здоровой, что приводит к резкому увеличению пожароопасности шелкопрядников. По литературным данным, влажность древесины при отмирании деревьев резко повышается только первые три-четыре года. Это создает благоприятные условия для поселения дереворазрушающих грибов. Затем влажность уменьшается и через пять-шесть лет становится ниже нормальной влажности неповрежденных деревьев и значительно снижается через 10–12 лет. В интервале пять — семь лет после усыхания гнилью поврежден сухостой пихты сибирской — 26,8 %, ели — 58,3, кедра — 43,1; валежа пихты — 81,1, ели — 98,7, кедра — 100 %. Мертвая древесина разрушается тем сильнее, чем больше она повреждена насекомыми [26, 27].

В перспективе площади участков, поврежденных сибирским шелкопрядом, частично зарастут злаками и лиственными породами, будут заболочены. В момент обследования на этих участках

Т а б л и ц а 3

Показатели запасов углерода в древостое и мертвой древесине (детрите), формируемой в результате отпада в темнохвойных древостоях после воздействия вспышки массового размножения сибирского шелкопряда

Indicators of carbon stock in the stand and dead wood (detritus) formed as a result of mortality in dark coniferous stands after Siberian silk moth mass reproduction outbreak

Номер пробной площади	Шифр пробной площади	древостой	Запас углерода, т·С/га												всего в мертвой древесине
			сухостой по породам					валежная древесина по породам							
			итого	П	К	Е	Б	итого	П	К	Е	С	Б	Лц	
1	СТ 6	34	7,9	5,4	2,5	–	–	6,5	3,0	3,5	–	–	–	3,0	14,4
2	СТ 5	58	3,0	2,6	0,4	–	–	2,4	0,8	1,5	–	–	–	0,8	5,4
3	СТ 2	77	5,5	0,0	5,5	–	–	6,1	6,0	0,1	–	–	–	6,0	11,6
4	СТ 1	14	17,6	9,5	4,7	3,4	–	1,4	1,3	0,1	0,1	–	–	1,3	19,0
5	Ирбей 80	47	17,7	3,4	14,3	–	–	0,3	0,1	0,1	–	0,0	–	0,1	18,0
6	СТ 3	48	6,3	2,5	3,9	–	–	6,8	6,6	0,1	–	–	0,1	6,6	13,1
7	Ирбей ПВ6	67	4,4	2,6	1,8	–	–	7,7	4,7	2,8	0,1	–	–	4,7	12,0
8	Ирбей 100	0	22,6	9,3	10,9	1,3	1,1	2,6	1,8	0,3	–	0,5	–	1,8	25,1
9	Ирбей 75–100	31	10,6	8,4	1,9	0,4	–	–	4,0	–	–	–	–	4,0	10,6
10	Ирбей 95	12	18,9	12,1	6,8	–	–	12,1	9,1	3,1	–	–	–	9,1	31,1
11	СТ 4	43	17,5	6,4	10,5	0,6	–	4,9	2,3	1,2	1,3	–	–	2,3	22,4
12	СТ 7	79	1,5	1,5	0,0	–	–	16,3	16,2	0,1	–	–	–	16,2	17,7
13	СТ 8	75	1,0	0,8	0,2	–	–	3,4	3,3	–	0,1	–	–	3,3	4,5
14	СТ 9	90	1,0	1,0	0,0	–	–	3,0	2,9	–	0,1	–	–	2,9	4,0

Примечание. Контрольные участки: СТ 7, СТ 8, СТ 9; породы: П — пихта; К — кедр; Е — ель; Б — береза; Лц — лиственница.

в результате изреживания полога и повышения светового притока наблюдалось обилие светолюбивых трав, осоки и злаков, происходило задержание почвы.

Площади участков, поврежденных сибирским шелкопрядом, достигают десятков тысяч гектар, и углеродный баланс на таких территориях однозначно имеет свой перечень специфических особенностей в процессе гибели насаждения и сукцессии. После переноса углерода из живой биомассы в мертвое органическое вещество углерод будет, по крайней мере, частично, высвобождаться в атмосферу посредством постепенного разложения гетеротрофными микроорганизмами [9]. Результаты расчетов запасов углерода в древостое и мертвой древесине участков древостоя, пораженных сибирским шелкопрядом, спустя два года после массовой дефолиации представлены в табл. 3. В среднем запас углерода мертвой древесины в поврежденных шелкопрядом участках составил $16,6 \pm 7,4$ т·С/га, очевидно, в последующие годы это значение будет возрастать, что требует проведения дополнительных наблюдений.

Выводы

Методом натурных обследований темнохвойных лесных формаций, поврежденных в результате массовой дефолиации гусеницами

сибирского шелкопряда (вспышка массового размножения 2018–2020 гг.), получены данные по запасам накопления крупных древесных остатков (отпада древостоя, детрита) с последующим определением количества углерода в мертвой древесине. Они могут служить основой для дальнейшего изучения динамики отпада и оценки баланса углерода в древостоях, претерпевших масштабные нарушения от воздействия фитофагов, что на региональном уровне важно для определения параметров эмиссии углерода в момент нарушения лесных экосистем и в последующие периоды. В перспективе представленные материалы могут быть востребованы для оценки процессов формирования отпада в древостоях, поврежденных сибирским шелкопрядом, для измерений рассматриваемых параметров по данным спутниковых фотоснимков, позволяющих охватывать обширные территории, в том числе труднодоступные.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Защита леса» проекта «Фундаментальные основы защиты лесов от энтомо- и фитовредителей в Сибири» (№ FEFE-2020-0014).

Авторы выражают особую благодарность Красноярскому региональному центру коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН за предоставленное оборудование для обеспечения выполнения проекта «Фундаментальные основы защиты лесов от энтомо- и фитовредителей в Сибири» (№ FEFE-2020-0014).

Список литературы

- [1] Martin A.R., Domke G.M., Doraisami M. Carbon fractions in the world's dead wood // *Nature Communications*, 2021, no. 12, p. 889. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21149-9>.
- [2] Šēnhofa S., Jaunslaviete I., Šņepsts G., Jansons J., Liepa L., Jansons Ā. Deadwood Characteristics in Mature and Old-Growth Birch Stands and Their Implications for Carbon Storage // *Forests*, 2020, v. 11, p. 536. <https://doi.org/10.3390/f11050536>
- [3] Griffiths H.M., Eggleton P., Hemming-Schroeder N., Swinfield T., Woon J.S., Allison S.D., Coomes D.A., Ashton L.A., Parr C.L. Carbon flux and forest dynamics: Increased deadwood decomposition in tropical rainforest tree-fall canopy gaps // *Global change biology*, 2021, v. 27, no. 8, pp. 1601–1613.
- [4] Seibold S., Rammer W., Hothorn T., Seidl R., Ulyshen M.D., Lorz J., Aragón R. The contribution of insects to global forest deadwood decomposition // *Nature*, 2021, no. 597, pp. 77–81. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03740-8>
- [5] Reed D.E., Ewers B.E., Pendall E., Frank J., Kelly R. Bark beetle-induced tree mortality alters stand energy budgets due to water budget changes // *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, v. 131, no. 1, pp. 153–165.
- [6] Clark K.L., Skowronski N., Hom J. Invasive insects impact forest carbon dynamics // *Global Change Biology*, 2010, v. 16, no. 1, pp. 88–101.
- [7] Aakala T. Tree mortality and deadwood dynamics in late-successional boreal forests // *Dissertationes Forestales*, 2010, v. 100, p. 41.
- [8] Monaco A.L., Latterini F., Tavankar F., Luziatelli G. Structure and dynamics of deadwood in pine and oak stands and their role in CO₂ sequestration in lowland forests of Central Italy // *Forests*, 2020, v. 11, no. 3, p. 253.
- [9] Fei S., Morin R., Oswald C., Liebhold A.M. Biomass losses resulting from insect and disease invasions in US forests // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, v. 116, no. 35, pp. 17371–17376.
- [10] Карелин Д.В., Уткин А.И. Скорость разложения крупных древесных остатков в лесных экосистемах // *Лесоведение*, 2006. № 2. С. 26–33.
- [11] Russell M., Fraver S., Aakala T., Fraver S., Gove J.H. Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood // *A review, Forest Ecology and Management*, 2015, v. 350, pp. 107–128. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.033>
- [12] Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Запасы дегриза, его депонирование и разложение в лесном фонде России: результаты расчетов // *Проблемы лесной фитопатологии и микологии: Материалы 6-й Междунар. конф., Петрозаводск, Карелия, 18–22 сентября 2005 г. Петрозаводск: Изд-во Института леса КарНЦ РАН, 2005. С. 136–141.*
- [13] Kharuk V.I., Im S.T., Soldatov V.V. Siberian silkmoth outbreaks surpassed geoclimatic barrier in Siberian Mountains // *J. of Mountain Science*, 2020, v. 17, pp. 1891–1900. DOI:10.1007/s11629-020-5989-3
- [14] Смагин В.Н., Ильинская С.А., Назимова Д.И., Новосельцева И.Ф., Чередникова Ю.С. Типы лесов гор Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1980. 336 с.
- [15] Schulze E.-D., Heimann M., Harrison S., Holland E., Lloyd J. *Global Biogeochemical Cycles in the Climate System*. Jena: Academic Press, 2010, p. 345.
- [16] Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесная пром-сть, 1982. 552 с.
- [17] Замолодчиков Д.Г., Уткин Г.Н., Коровин А.И. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // *Лесоведение*, 1998. № 3. С. 84–93.
- [18] Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27 мая 2022 г. № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (дата обращения 11.12.2022).
- [19] Журавлев Г.П. Рекомендации по надзору за сибирским шелкопрядом в лесах Дальнего Востока. Хабаровск: Изд-во ДальНИИЛХ, 1960. 33 с.
- [20] Ряполов В.Я. Формирование избыточно-плотных популяций черного пихтового усача в очагах хвоегрызущих насекомых и его численность в разреженных популяциях // *Леса Урала и хозяйство в них. Екатеринбург, 2001. Вып. 21. С. 319–333.*
- [21] Гродницкий Д.Л., Разнобарский В.Г., Солдатов В.В., Ремарчук Н.П. Деграция древостоев в таежных шелкопрядниках // *Сибирский экологический журнал*, 2002. Приложение 1. С. 3–12.
- [22] Кривоуцкая Г.О. Скрытостволовые вредители в темных хвойных лесах Западной Сибири, поврежденных сибирским шелкопрядом. М.; Л.: Наука, 1965. 130 с.
- [23] Исаев А.С., Рожков А.С., Киселев В.В. Черный пихтовый усач *Monochamus urussovi* (Fisch.). Новосибирск: Наука, 1988. 270 с.
- [24] Kharuk V.I., Fedotova E.V., Demidko D., Dvinskaya M.L. Spatial and temporal dynamics of Siberian silkmoth large-scale outbreak in dark-needle coniferous tree stands in // *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, v. 9 (№ 6), pp. 711–720. DOI:10.1134/S199542551606007X
- [25] Перевозникова В.Д., Баранчиков Ю.Н. Структура запасов наземной фитомассы в свежих шелкопрядниках пихтовой тайги Нижнего Приангарья // *Энтомологические исследования в Сибири. Красноярск: Изд-во КФ СО РЭО, 1999. Вып. 2. С. 87–102.*
- [26] Баранчиков Ю.Н., Перевозникова В.Д., Кондаков Ю.П., Кириченко Н.И. Зоогенный вклад в эмиссии углерода в очагах массового размножения сибирского шелкопряда // *Лесные экосистемы Енисейского меридиана (исследования по международной геосферно-биосферной программе)*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 117–123.
- [27] Баранчиков Ю.Н., Перевозникова В.Д. Очаги массового размножения сибирского шелкопряда как источники дополнительного выброса углерода // *Чтения памяти В.Н. Сукачева. XX. Насекомые в лесных биогеоценозах. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. С. 32–53.*

Сведения об авторах

Мохирев Александр Петрович [✉] — д-р. техн. наук, вед. инж. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», ale-mokhirev@yandex.ru

Сультсон Светлана Михайловна — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», sultson2011@yandex.ru

Михайлов Павел Владимирович — канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр. лаборатории «Лесных экосистем», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», mihaylov.p.v@mail.ru

Слинкина Ольга Александровна — инж. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», sloa@mail.ru

Кулакова Надежда Николаевна — канд. с.-х. наук, мл. науч. сотр. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», nadezha21@mail.ru

Кулаков Сергей Сергеевич — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», hbz_sibstu@mail.ru

Демидко Денис Александрович — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», sawer-beetle@yandex.ru

Мельниченко Наталья Павловна — мл. науч. сотр. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», natalia.melnichenko@mail.ru

Горошко Андрей Александрович — мл. науч. сотр. лаборатории «Защита леса», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 902970@list.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023.

Одобрено после рецензирования 17.04.2023.

Принята к публикации 06.10.2023.

CARBON STOCK ASSESSMENT IN DARK CONIFEROUS MOUNTAIN TAIGA FORESTS OF KRASNOYARSK INFESTED BY SIBERIAN SILKMOTH

A.P. Mokhirev✉, S.M. Sultson, P.V. Mikhaylov,
O.A. Slinkina, N.N. Kulakova, S.S. Kulakov,
D.A. Demidko, N.P. Melnichenko, A.A. Goroshko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarskii rabochii av., 660037, Krasnoyarsk, Russia
ale-mokhirev@yandex.ru

The results of field studies on the assessment of carbon stock in the dead wood of dark coniferous forest formations damaged as a result of mass defoliation caused by Siberian silkmoth caterpillars are presented. The full-scale survey was carried out within the boundaries of the Altai-Sayan Mountains taiga forest region (Irbeisk forestry in the Krasnoyarsk Territory). According to the obtained observations, after a two-year period since the outbreak suppression, there is a massive withering of dark coniferous forests due to extremely low resistance to the loss of needles (with defoliation from 25 % and more, stands die almost completely). The stand mortality at the time of the study averaged 64 ± 25 %, the values vary from 24 to 100 %. The results on the standing volume of large wood residues (stand mortality, detritus) were obtained, followed by the carbon stock assessment in the dead wood damaged by silk moth. Analysis of the structure of dead wood stocks by decomposition stages reveals the beginning of a dynamic process of the appearance of newly dead wood with the transition to the second stage. On average, the carbon stock of dead wood in the damaged areas was $16,6 \pm 7,4$ t C/ga with an obvious increase in the amount in the future. The results obtained are the basis for further study of the decay dynamics and assessment of the carbon balance in stands that have undergone large-scale disturbances from phytophages, which is important at the regional level for determining the parameters of carbon emissions at the time of forest ecosystems disturbance and in subsequent periods.

Keywords: Siberian silkmoth, dark coniferous forest formations, stand decay, detritus, wood decomposition, carbon stock

Suggested citation: Mokhirev A.P., Sultson S.M., Mikhaylov P.V., Slinkina O.A., Kulakova N.N., Kulakov S.S., Demidko D.A., Melnichenko N.P., Goroshko A.A. *Otsenka zapasov ugleroda v narushennykh sibirskim shelkopryadom temnokhvoinnykh gorno-taizhnykh lesakh Krasnoyarskogo kraya* [Carbon stock assessment in dark coniferous mountain taiga forests of Krasnoyarsk infested by Siberian silkmoth]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 18–30. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-18-30

References

- [1] Martin A.R., Domke G.M., Doraisami M. Carbon fractions in the world's dead wood. *Nature Communications*, 2021, no. 12, p. 889. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21149-9>.
- [2] Šenhofa S., Jaunslaviete I., Šņepsts G., Jansons J., Liepa L., Jansons Ā. Deadwood Characteristics in Mature and Old-Growth Birch Stands and Their Implications for Carbon Storage. *Forests*, 2020, v. 11, p. 536. <https://doi.org/10.3390/f11050536>
- [3] Griffiths H.M., Eggleton P., Hemming-Schroeder N., Swinfield T., Woon J.S., Allison S.D., Coomes D.A., Ashton L.A., Parr C.L. Carbon flux and forest dynamics: Increased deadwood decomposition in tropical rainforest tree-fall canopy gaps. *Global change biology*, 2021, v. 27, no. 8, pp. 1601–1613.
- [4] Seibold S., Rammer W., Hothorn T., Seidl R., Ulyshen M.D., Lorz J., Aragón R. The contribution of insects to global forest deadwood decomposition. *Nature*, 2021, no 597, pp. 77–81. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03740-8>
- [5] Reed D.E., Ewers B.E., Pendall E., Frank J., Kelly R. Bark beetle-induced tree mortality alters stand energy budgets due to water budget changes. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, v. 131, no. 1, pp. 153–165.
- [6] Clark K.L., Skowronski N., Hom J. Invasive insects impact forest carbon dynamics. *Global Change Biology*, 2010, v. 16, no. 1, pp. 88–101.
- [7] Aakala T. Tree mortality and deadwood dynamics in late-successional boreal forests. *Dissertationes Forestales*, 2010, v. 100, p. 41.
- [8] Monaco A.L., Latterini F., Tavankar F., Luziatelli G. Structure and dynamics of deadwood in pine and oak stands and their role in CO₂ sequestration in lowland forests of Central Italy. *Forests*, 2020, v. 11, no. 3, p. 253.
- [9] Fei S., Morin R., Oswalt C., Liebhold A.M. Biomass losses resulting from insect and disease invasions in US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, v. 116, no. 35, pp. 17371–17376.
- [10] Karelin D.V., Utkin A.I. *Skorost' razlozheniya krupnykh drevesnykh ostatkov v lesnykh ekosistemah* [Decomposition rate of large wood residues in forest ecosystems]. *Lesovedenie [Forestry]*, 2006, no. 2, pp. 26–33.
- [11] Russell M., Fraver S., Aakala T., Fraver S., Gove J.H. Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood. A review, *Forest Ecology and Management*, 2015, v. 350, pp. 107–128. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.033>
- [12] Zamolodchikov D.G., Utkin A.I. *Zapasy debris, ego deponirovanie i razlozhenie v lesnom fonde rossii: rezul'taty raschetov* [Stocks of debris, its deposition and decomposition in the forest fund of Russia: results of calculations. *Problemy lesnoy fitopatologii i mikologii* [Problems of forest Phytopathology and Mycology], Petrozavodsk, Karelia, September 18–22, 2005. Petrozavodsk: Karelns RAS Forest Institute, 2005, pp. 136–141.

- [13] Kharuk V.I., Im S.T., Soldatov V.V. Siberian silkmoth outbreaks surpassed geoclimatic barrier in Siberian Mountains. *J. of Mountain Science*, 2020, v. 17, pp. 1891–1900. DOI:10.1007/s11629-020-5989-3
- [14] Smagin V.N., Il'inskaya S.A., Nazimova D.I., Novosel'tseva I.F., Cherednikova Yu.S. *Tipy lesov gor Yuzhnoy Sibiri* [Types of forests of the mountains of Southern Siberia]. Novosibirsk: Nauka, 1980. 336 p.
- [15] Schulze E.-D., Heimann M., Harrison S., Holland E., Lloyd J. *Global Biogeochemical Cycles in the Climate System*. Jena: Academic Press, 2010, p. 345.
- [16] Anuchin N.P. *Lesnaya taksatsiya* [Forest taxation]. M.: Forest Industry, 1982. 552 p.
- [17] Zamolodchikov D.G., Utkin G.N., Korovin A.I. *Opreделение zapasov ugleroda po zavisimym ot vozrasta nasazhdeniy konversionno-ob'emnym koeffitsientam* [Determination of carbon reserves by age-dependent plantings conversion-volume coefficients]. *Lesovedenie* [Forest science], 1998, no. 3, pp. 84–93.
- [18] *Prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 27 maya 2022 g. № 371 «Ob utverzhdenii metodik kolichestvennogo opredeleniya ob'emov vybrosov parnikovykh gazov i pogloshcheniy parnikovykh gazov»* [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated May 27, 2022. no. 371 «On approval of methods for quantitative determination of greenhouse gas emissions and greenhouse Gas uptake»]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (accessed 11.12.2022).
- [19] Zhuravlev G.P. *Rekomendatsii po nadzoru za sibirskim shelkopryadom v lesakh Dal'nego Vostoka* [Recommendations for the supervision of the Siberian silkworm in the forests of the Far East]. Khabarovsk: DalnIILKH, 1960, 33 p.
- [20] Ryapolov V.Ya. *Formirovaniye izbytochno-plotnykh populyatsiy chernogo pikhtovogo usacha v ochagakh khvoegryzushchikh nasekomykh i ego chislennost' v razrezhennykh populyatsiyakh* [Formation of excessively dense populations of black fir barbel in foci of needle-gnawing insects and its number in sparse populations]. *Lesnaya Urala i khozyaystvo v nikh* [Forests of the Urals and the economy in them], 2001, v. 21, pp. 319–333.
- [21] Grodnitskiy D.L., Raznobarskiy V.G., Soldatov V.V., Remarchuk N.P. *Degradatsiya drevostoev v taezhnykh shelkopryadnikakh* [Degradation of stands in taiga silkworms]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Ecological Journal], 2002, appendix 1, pp. 3–12.
- [22] Krivolutskaya G.O. *Skrytostvolovye vrediteli v temnokhvoynnykh lesakh Zapadnoy Sibiri, povrezhdennykh sibirskim shelkopryadom* [Hidden-stemmed pests in the dark coniferous forests of Western Siberia damaged by the Siberian silkworm]. Moscow–Leningrad: Nauka, 1965, 130 p.
- [23] Isaev A.S., Rozhkov A.S., Kiselev V.V. *Chernyy pikhtovyy usach Monochamus urussovi (Fisch.)* [Black fir barbel *Monochamus urussovi* (Fisch.)]. Novosibirsk: Nauka, 1988, 270 p.
- [24] Kharuk V.I., Fedotova E.V., Demidko D., Dvinskaya M.L. Spatial and temporal dynamics of Siberian silkmoth large-scale outbreak in dark-needle coniferous tree stands in. *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, v. 9 (№ 6), pp. 711–720. DOI:10.1134/S199542551606007X
- [25] Perevoznikova V.D., Baranchikov Yu.N. *Struktura zapasov nazemnoy fitomassy v svezhikh shelkopryadnikakh pikhtovoy taygi Nizhnego Priangara ya* [The structure of terrestrial phytomass reserves in fresh silkworms of the fir taiga of the Lower Angara region]. *Entomologicheskie issledovaniya v Sibiri* [Entomological studies in Siberia]. Krasnoyarsk: KF SO REO, 1999, iss. 2, pp. 87–102.
- [26] Baranchikov Yu.N., Perevoznikova V.D., Kondakov Yu.P., Kirichenko N.I. *Zoogennyy vklad v emissii ugleroda v ochagakh massovogo razmnozheniya sibirskogo shelkopryada* [Zoogenic contribution to carbon emissions in the centers of mass reproduction of the Siberian silkworm]. *Lesnye ekosistemy Eniseyskogo meridiana (issledovaniya po mezhdunarodnoy geosferno-biosfernoy programme)* [Forest ecosystems of the Yenisei meridian (research on the international geosphere-biosphere program)]. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2002, pp. 117–123.
- [27] Baranchikov Yu.N., Perevoznikova V.D. *Ochagi massovogo razmnozheniya sibirskogo shelkopryada kak istochniki dopolnitel'nogo vybrosa ugleroda* [Centers of mass reproduction of the Siberian silkworm as sources of additional carbon emission]. *Chteniya pamyati V.N. Sukacheva. KhKh. Nasekomye v lesnykh biogeotsenozakh* [Readings of memory V.N. Sukachev. XX. Insects in forest biogeocenoses]. Moscow: Comrade Scientific Publishing House of the CMC, 2004, pp. 32–53.

Acknowledgments

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia for the implementation of the project «Fundamental bases of forest protection from entomo- and phytopests in Siberia» (№ FEFE-2020-0014) by the team of the scientific laboratory «Forest Protection».

The authors express their special gratitude to the Krasnoyarsk Regional Centre for Collective Use of FIC KSC SB RAS for the equipment provided to ensure the implementation of the project «Fundamental Basis of Forest Protection from Entomo- and Phytopests in Siberia» (№ FEFE-2020-0014).

Authors' information

Mokhirev Aleksandr Petrovich ✉ — Dr. Sci. (Tech.), Lead Engineer of the Forest Protection Laboratory of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ale-mokhirev@yandex.ru

Sultson Svetlana Mikhaylovna — Cand. Sci. (Agr.), Senior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, sultson2011@yandex.ru

Mikhaylov Pavel Vladimirovich — Cand. Sci. (Agr.), Leading Researcher, Laboratory of Forest Ecosystems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, mihaylov.p.v@mail.ru

Slinkina Olga Aleksandrovna — Engineer, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, sloa@mail.ru

Kulakova Nadezhda Nikolaevna — Cand. Sci. (Agr.), Junior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, nadezha21@mail.ru

Kulakov Sergey Sergeevich — Cand. Sci. (Bio.), Senior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, hbz_sibstu@mail.ru

Demidko Denis Aleksandrovich — Cand. Sci. (Bio.), Senior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, sawer-beetle@yandex.ru

Melnichenko Natalya Pavlovna — Junior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, natalia.melnichenko@mail.ru

Goroshko Andrey Aleksandrovich — Junior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 902970@list.ru

Received 01.03.2023.

Approved after review 17.04.2023.

Accepted for publication 06.10.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest