

УДК 528.94: [630.162:502.17]

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-53-62>

## Применение ГИС-технологий для оценки запасов углерода лесов, погибших от воздействия энтомовредителей

О. А. Слинкина<sup>1✉</sup>, П. В. Михайлов<sup>1</sup>, Д. А. Демидко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Российская Федерация

e-mail: sloa@mail.ru

**Аннотация.** В аспекте глобальных климатических изменений, ассоциируемых с антропогенными эмиссиями парниковых газов, главной функцией лесных экосистем является поглощение углекислого газа из атмосферы и депонирование его в фитомассе. Выбросы парниковых газов, происходящие при гибели лесов, могут превращать их из поглотителя парниковых газов в источник. Для понимания поглотительной способности лесных экосистем необходимо оценить баланс между поглощением углерода и его эмиссией. Целью исследования являлась разработка методических подходов применения данных дистанционного зондирования и геоинформационных технологий (ГИС) для оценки запасов углерода, содержащихся в погибших деревьях. На основе данных съемки спутника Sentinel-2, информации таксационных описаний нарушенных участков леса, в ГИС сформирована карта пространственного распределения запасов углерода погибших насаждений. Объемные запасы мертвой древесины составили 8,08 млн м<sup>3</sup>, на площади 42,08 тыс. га, или, в среднем, 192 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>. Потери составили 73 % от первоначальных запасов. Запасы углерода, сосредоточенные в погибших деревьях, составили 2,56 млн т. Средний запас углерода погибших насаждений составил 60,8 т га<sup>-1</sup>. Распределение запасов углерода погибших по отдельным фракциям: стволы – 1,68 млн т (39,9 т га<sup>-1</sup>), ветви – 0,28 млн т (6,5 т га<sup>-1</sup>), корни – 0,48 млн т (11,4 т га<sup>-1</sup>), листья/хвоя 0,12 млн т (3 т га<sup>-1</sup>).

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, геоинформационные системы, углерод, энтомовредители, сибирский шелкопряд, погибшие лесные насаждения

### Для цитирования:

Слинкина О. А., Михайлов П. В., Демидко Д. А. Применение ГИС-технологий для оценки запасов углерода лесов, погибших от воздействия энтомовредителей. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 53–62. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-53-62>

## GIS-based assessment of carbon stocks in forests devastated by insect pests

О. А. Slinkina<sup>1✉</sup>, P. V. Mikhailov<sup>1</sup>, D. A. Demidko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

e-mail: sloa@mail.ru

**Abstract.** In the context of global climate change driven by anthropogenic greenhouse gas emissions, a primary function of forest ecosystems is the absorption of atmospheric CO<sub>2</sub> and its sequestration in biomass. Emissions of greenhouse gases resulting from forest dieback can transform these ecosystems from sinks to sources. Quantifying the balance between carbon uptake and emissions is thus critical for assessing forest carbon sequestration capacity. The objective of the study was to develop methodological approaches using remote sensing data and geographic information systems (GIS) to estimate carbon stocks in dead trees. Based on Sentinel-2 satellite imagery and taxation data from

disturbed forest areas, a GIS-based map depicting the spatial distribution of carbon stocks in deadwood was generated. Deadwood volume totaled 8.08 million m<sup>3</sup> over 42,080 ha, averaging 192 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Losses represented 73% of the initial stocks. Total carbon stocks in dead trees amounted to 2.56 million tons, averaging 60.8 t ha<sup>-1</sup>. The distribution of carbon stocks in dead biomass fractions was as follows: stems – 1.68 million t (39.9 t ha<sup>-1</sup>), branches – 0.28 million t (6.5 t ha<sup>-1</sup>), roots – 0.48 million t (11.4 t ha<sup>-1</sup>), and leaves/needles – 0.12 million t (3.0 t ha<sup>-1</sup>).

**Keywords:** remote sensing, geographic information systems, carbon, insect pests, Siberian silkworm, dead forest stands

**For citation:**

Slinkina O. A., Mikhailov P. V., Demidko D. A. (2026). GIS-based assessment of carbon stocks in forests devastated by insect pests. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 53–62. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-53-62>

**Введение**

Леса играют ключевую роль в процессах глобальных климатических изменений, поглощая углерод из атмосферы в размере порядка 15,6 млрд тонн CO<sub>2</sub> (4,25 млрд. тонн углерода) в год [1], компенсируя около 30 % антропогенных выбросов парниковых газов на планете [2]. Бореальные леса являются вторым по величине наземным биомом, составляя порядка 27 % площади мировых лесов. По данным на 2020 г. 73 % бореальных лесов произрастает на территории России [3], составляя 90 % лесного фонда нашей страны [4]. Однако негативные последствия изменения климата, такие как увеличение количества и площади лесных пожаров, ветровалов, вспышки размножения насекомых-энтомофитов, в сочетании с хозяйственной деятельностью человека, могут изменить роль лесов, превратив их из поглотителя углерода в источник.

Динамика климатических изменений на территории России отличается от среднемировой. По данным Росгидромета, темпы потепления на территории России примерно в 2,5 раза выше мировых и составляют за период 1976–2020 гг. 0,51 °C/10 лет (при росте глобальной температуры 0,18 °C/10 лет) [5]. Таким образом, бореальные леса, произрастающие на территории нашей страны, находятся в настоящее время в климатических условиях, способствующих увеличению частоты и площади вспышек массового размножения насекомых-энтомофитов [6–8].

Ежегодно на территории России энтомофитами повреждаются до 2 млн га лесов [9]. Повреждения ведут к массовым усыханиям древостоев и последующим эмиссиям углерода, депонированного в фитомассе, в атмосферу, в процессе разложения древесных остатков.

Количественная оценка запасов углерода, выделяющегося в атмосферу вследствие таких эмиссий, важна с точки зрения климатической политики, экологического мониторинга, устойчивого лесопользования. В том числе, она позволяет: определить вклад лесов в бюджет углерода и разработать подходы для усиления их поглощающей способности; оценить потенциал лесоклиматических проектов; адаптировать управление лесами к условиям меняющегося климата; может быть использована в глобальных климатических моделях для построения прогнозов и оценки эффективности стратегий буферизации климатических изменений.

Геоинформационные системы совместно с данными дистанционного зондирования широко применяются в оценке запасов и динамики углерода в лесах [10, 11], позволяя проводить обработку спутниковых снимков, моделирование углеродного баланса и картографирование результатов.

Цель исследования – разработка методических подходов и алгоритмов применения данных дистанционного зондирования и геоинформационных технологий для оценки степени повреждений лесов энтомофитами, расчетов запасов углерода, содержащихся в погибших деревьях, что дает возможность

моделирования динамики эмиссий углерода в атмосферу, происходящих после гибели древостоя в процессе деструкции.

### Методы и материалы

Исследование выполнено для участка темнохвойной тайги, расположенного на юге Красноярского края, на котором в период с 2018 по 2020 г. наблюдалась вспышка массового размножения сибирского шелкопряда *Dendrolimus sibiricus* – опасного хвоегрызущего вредителя, охватившая площадь более 40 тыс. га. В работе, выполненной на предыдущем этапе исследования, с применением данных дистанционного зондирования были определены границы и состояние поврежденных участков леса. По данным съемки Sentinel-2/MSI рассчитан ряд спектральных индексов и определено, что индекс NBR показывает максимальную из рассмотренных индексов корреляцию с данными наземных измерений ( $R^2 = 0,85$ ). Получена линейная регрессионная модель, связывающая значения индекса NBR с количественными показателями поврежденных деревьев. В соответствии с регрессионной моделью проведен попиксельный пересчет значений индекса NBR в долю погибших деревьев, усредненную по площади пикселя. Таким образом, для всей территории исследуемого участка леса, поврежденного сибирским шелкопрядом, определена доля погибших деревьев в каждой элементарной области, с пространственным разрешением  $10 \times 10$  метров. Результаты первого этапа работы опубликованы в [12].

На текущем этапе исследования, для оценки запасов углерода, содержащихся в поврежденных насаждениях, использованы данные лесной таксации. Изучаемый участок поврежденного шелкопрядом леса расположен в Кунгусском участковом лесничестве, на территории Ирбейского лесничества Красноярского края. Для данного участка леса получены лесоустроительные планшеты – карты-схемы с нанесенными границами и номерами таксационных кварталов и выделов. В геоинформационной системе QGIS были выполнены их географическая привязка и векторизация. В качестве атрибутивной информации

к каждому полигону таксационного выдела добавлены данные лесной таксации, необходимые для расчета запасов углерода: породный состав (перечень древесных пород выдела с долей каждой породы в общем запасе древесины), класс и группа возраста, средний запас древесины на 1 гектар (рис. 1).

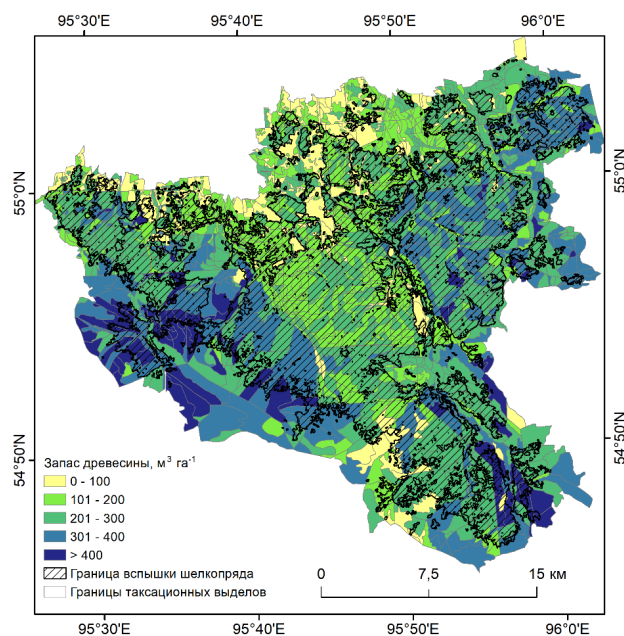
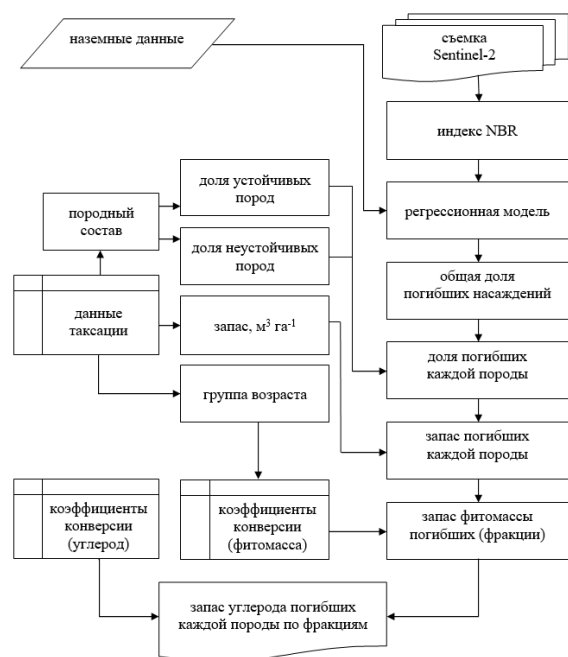


Рис. 1. Средний запас древесины таксационных выделов, нарушенных сибирским шелкопрядом

Полигональный векторный слой с таксационными показателями древостоев был пространственно пересечен со слоем, содержащим данные о доле погибших деревьев. Это позволило получить результирующий слой пространственных полигональных объектов, объединяющий атрибутивную информацию и границы двух пересекаемых слоев. Таким образом, для элементарных участков с пространственным разрешением  $10 \times 10$  метров определено: общая доля погибших насаждений, общий запас древесины до воздействия сибирского шелкопряда, породный состав, группа возраста насаждений, площадь.

Для вычисления запасов углерода погибших насаждений был разработан алгоритм, реализованный в ГИС (рис. 2). При разработке алгоритма мы руководствовались описанными ниже соображениями.



**Рис. 2.** Блок-схема вычисления запасов углерода, содержащихся в поврежденных сибирским шелкопрядом древостоях

Известно, что наиболее благоприятными кормовыми объектами для сибирского шелкопряда являются хвоя лиственницы, пихты, кедра сибирского, и, в меньшей степени, ели [13, 14]. Но при недостатке хвои на предпочитаемых шелкопрядом в качестве корма породах деревьев его гусеницы могут переходить к питанию другими хвойными [13]. Вероятность же гибели дефолированных деревьев, при прочих равных, зависит от их устойчивости к этому виду повреждения. Известно, что наименее устойчивыми являются темнохвойные виды (кедр, пихта, ель). Светлохвойные виды восстанавливают хвою быстрее, и поэтому лиственница, относящаяся к предпочитаемым сибирским шелкопрядом породам, как правило, восстанавливается после дефолиации. То же касается сосны в случае, если гусеницы *D. sibiricus* переходят на питание ее хвоей из-за истощения кормовой базы [13, 15, 16]. Данные о питании сибирским шелкопрядом на лиственных породах в известных нам источниках отсутствуют, но анализ данных перечёта деревьев в шелкопрядниках показывает, что в результате массового размножения сибирского шелкопряда, возможно, из-за его косвенных последствий, могут гибнуть и они

[16]. Факт гибели лиственных также подтверждается нашими собственными наблюдениями в ходе полевых работ в шелкопрядниках.

Исходя из этого, мы разделили все породы деревьев, встречающиеся в таксационных описаниях, на два класса – неустойчивые (интенсивно повреждаемые и плохо восстанавливающиеся после дефолиации) и устойчивые. К неустойчивым отнесены пихта, кедр и ель. К устойчивым – лиственница, сосна, осина, береза. В случае, если доля погибших насаждений не превышала долю неустойчивых пород на выделе, мы считали, что повреждаются только неустойчивые породы, весь запас отмершей древесины сосредоточен в них и разделен между ними в равной пропорции. Если доля погибших превышала долю неустойчивых, то погибшими считались все неустойчивые породы, а также часть устойчивых. Доля погибших деревьев устойчивых видов в таком случае распределялась между ними пропорционально их доле по запасу в древостое. Таким образом, для каждой древесной породы произрастающей в границах каждого полигона согласно данным таксации, была определена доля погибших насаждений. Объемный запас древесины, содержащейся в погибших деревьях, определялся по формуле:

$$M_i = F_i \cdot S \cdot V,$$

где  $M_i$  – объемный запас древесины погибших насаждений породы  $i$ ,  $m^3$ ,

$F_i$  – доля погибших насаждений породы  $i$ ,

$S$  – площадь полигона, га,

$V$  – объемный запас древесины на выделе по данным таксации,  $m^3 \text{ га}^{-1}$ .

Для определения запасов углерода, содержащихся в погибших насаждениях, сначала проведен пересчет запасов древесины из объемных единиц в единицы массы (фитомассы). После этого запасы фитомассы конвертировались в запасы углерода. Расчет запасов фитомассы производился с использованием коэффициентов конверсии, разработанных для основных лесообразующих пород России с учетом климатических зон [17]. В настоящей работе применялись коэффициенты для семи древесных пород, подзоны южной тайги (таблица). Запас фитомассы определялся с учетом

ее фракционной структуры (стволы, ветви, корни, листва/хвоя). Формула для определения запасов фитомассы отдельных фракций имела следующий вид:

$$Ph_{ijk} = M_{ij} \cdot K_{ijk},$$

где  $Ph_{ijk}$  – запас фитомассы погибших насаждений породы  $i$  группы возраста  $j$  фракции  $k$ , т;

$M_{ij}$  – объемный запас древесины погибших насаждений породы  $i$  группы возраста  $j$ , м<sup>3</sup>;

$K_{ijk}$  – коэффициент конверсии для породы  $i$  группы возраста  $j$  фракции  $k$ , т м<sup>-3</sup>.

Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу для основных лесообразующих пород района исследования, т м<sup>-3</sup>

Порода	Группа возраста	Фракции			
		Стволы	Ветви	Корни	Листва/ хвоя
Сосна	Молодняки	0,426	0,092	0,134	0,074
	Средневозрастные	0,434	0,058	0,109	0,026
	Приспевающие	0,440	0,051	0,109	0,019
	Спелые и перестойные	0,445	0,053	0,117	0,117
Ель	Молодняки	0,398	0,126	0,147	0,140
	Средневозрастные	0,417	0,072	0,149	0,046
	Приспевающие	0,419	0,067	0,149	0,040
	Спелые и перестойные	0,424	0,059	0,161	0,032
Пихта	Молодняки	0,371	0,115	0,112	0,132
	Средневозрастные	0,365	0,067	0,083	0,046
	Приспевающие	0,365	0,061	0,079	0,036
	Спелые и перестойные	0,370	0,060	0,082	0,031
Лиственница	Молодняки	0,516	0,157	0,254	0,057
	Средневозрастные	0,490	0,062	0,166	0,017
	Приспевающие	0,486	0,048	0,150	0,012
	Спелые и перестойные	0,504	0,053	0,185	0,011
Кедр	Молодняки	0,414	0,136	0,191	0,093
	Средневозрастные	0,426	0,074	0,135	0,029
	Приспевающие	0,443	0,065	0,117	0,028
	Спелые и перестойные	0,460	0,062	0,108	0,033
Береза	Молодняки	0,524	0,118	0,244	0,057
	Средневозрастные	0,532	0,083	0,169	0,022
	Приспевающие	0,532	0,076	0,143	0,016
	Спелые и перестойные	0,527	0,083	0,137	0,015
Осина	Молодняки	0,403	0,093	0,305	0,065
	Средневозрастные	0,426	0,080	0,202	0,025
	Приспевающие	0,431	0,070	0,167	0,017
	Спелые и перестойные	0,444	0,069	0,135	0,012

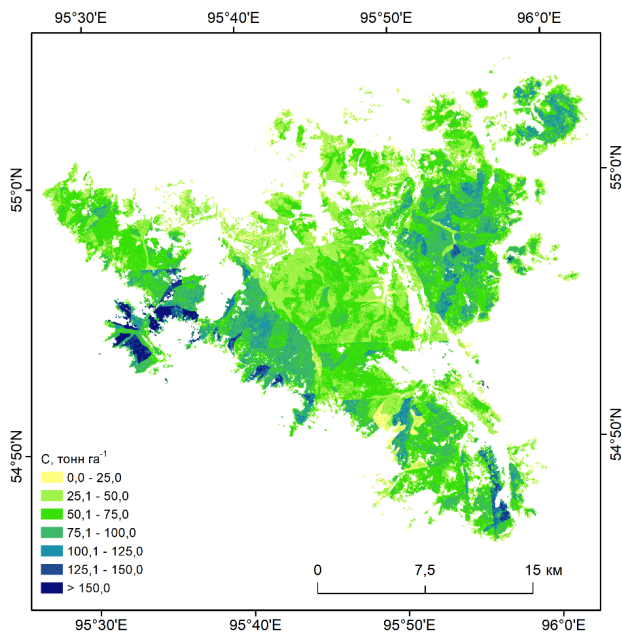
Конвертация запасов фитомассы в запасы углерода производилась с применением следующих переводных коэффициентов: для фракций стволов, ветвей, корней – 0,5; для фракции листвы/хвои – 0,45 [18]. В результате создан векторный полигональный слой, содержащий расчеты попиксельных (пространственное разрешение 10 м) значений запасов углерода погибших древостоев.

### Результаты и обсуждение

Для изучаемого участка леса, поврежденного вспышкой массового размножения си-

бирского шелкопряда, получена количественная оценка объемного запаса мертвой древесины, составившая 8,08 млн м<sup>3</sup>, или, в среднем, 192 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>. С использованием коэффициентов конверсии объемные запасы древесины пересчитаны в единицы фитомассы, и, далее, в запасы углерода отдельных фракций. Для всей нарушенной территории запасы углерода, сосредоточенные в погибших деревьях, оцениваются в 2,56 млн тонн. Средний запас углерода погибших насаждений составляет 60,8 т га<sup>-1</sup>. Распределение запасов углерода погибших по отдельным фракциям: стволы – 1,68 млн т (39,9 т га<sup>-1</sup>), ветви – 0,28 млн т

(6,5 т га<sup>-1</sup>), корни – 0,48 млн т (11,4 т га<sup>-1</sup>), листья/хвоя 0,12 млн т (3 т га<sup>-1</sup>). По результатам расчетов в ГИС сформирована карта пространственного распределения запасов углерода погибших насаждений (рис. 3).



**Рис. 3.** Запасы углерода погибших насаждений (суммарно по всем фракциям)

Запасы древесины изучаемого участка леса по данным лесной таксации до повреждения сибирским шелкопрядом составляли 11,11 млн м<sup>3</sup> на площади 42,08 тыс. га, или, в среднем 264 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>. Таким образом, согласно расчетам, повреждение древостоев сибирским шелкопрядом привело к утрате порядка 73 % объемных запасов насаждения.

В работе [19] приведены оценки запасов сухостоя и валежа в шелкопрядниках Красноярского края, суммарно достигающие 250 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>. В работе [20] приведены оценки запасов крупных древесных остатков в очагах сибирского шелкопряда для темнохвойных лесов Красноярского края, составляющие от 200 до 400 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>. По нашим собственным оценкам, полученным в ходе проведенных на изучаемом участке леса полевых исследований [12], потери стволовой древесины относительно ее общего запаса составили для всех пробных площадей в среднем 252 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>, при среднем запаса до нарушения 410 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>, что в процентном соотношении составляет 61 % по-

терь объемного запаса древесины. Приведенные выше оценки согласуются с полученными нами в результате расчетов данными.

Депонированный в мертвой древесине углерод в процессе разложения древесных остатков будет высвобождаться в атмосферу в виде углекислого газа. Время разложения крупных древесных остатков (КДО) хвойных пород для южной тайги составляет 60–120 лет, для сухостоя и стволов, не лежащих на земле, может достигать 300 лет [21, 22]. Время, соответствующее разложению КДО хвойных, уменьшается в ряду: ветви кедра > ветви ели и пихты > стволы кедра > стволы пихты > стволы ели [23].

Процессы разложения чаще всего описываются экспоненциальными моделями. По разным оценкам, скорость разложения КДО кедра – до 1 % в год, пихты и ели – до 2-3 %. Скорость разложения корней не зависит от древесной породы, и оценивается от 1 до 3,4 % в год [22–24].

Большая часть хвои погибших деревьев, попадая на поверхность почвы в виде отходов жизнедеятельности гусениц шелкопряда и опада, является наиболее мобильным субстратом для биологической трансформации. Так, спустя три месяца после гибели, теряется до 50 % запаса углерода зоогенного опада, более 90 % массы опада разлагается в первые два года после вспышки [25].

Таким образом, длительное время после гибели поврежденного шелкопрядом древостоя, в атмосферу, почву и воду будет высвобождаться накопленный древостоем углерод. Максимальные эмиссии будут наблюдаться первые десятилетия после вспышки, превращая углеродный баланс нарушенного участка леса из стока углерода в источник.

### Заключение

Разработана методика применения данных дистанционного зондирования и геоинформационных технологий для оценки повреждений лесов энтомовредителями, расчетов запасов углерода, содержащихся в погибших деревьях. Получены пространственно-распределенные оценки запасов углерода, депонированного в древостоях, погибших от вспышки массового размножения сибирского шелкопряда.

На точность полученных в данной работе оценок влияет ряд факторов. Ключевое допущение работы – разделение всех древесных пород на два класса устойчивости к воздействию шелкопряда (устойчивые и неустойчивые), с последующим пропорциональным распределением гибели внутри каждого класса. Данная модель является упрощением реальной экологической ситуации и используется в силу невозможности более точных оценок из-за влияния на смертность деревьев помимо принадлежности к определенной древесной породе слишком большого количества факторов: локальных лесорастительных условий, локального породного состава и плотности популяции гусениц шелкопряда, возраста конкретного дерева и наличия у него грибковых или вирусных заболеваний и т. д. Помимо этого точность оценок определяется: среднеквадратической ошибкой регрессионной модели, применяемой для расчета доли погибших деревьев по спутниковым снимкам (11,4 %); ошибкой определения объемных запасов древесины на выделе по данным таксации (согласно нормативам таксации лесов –

до 10 % [26]); точностью коэффициентов конверсии, применяемых при пересчете запасов насаждений в фитомассу (точность для стволов составляет 2,1 %, для ветвей 14,1 %, для корней 13,4 %, для листьев/хвои 17,1 % [17]).

Несмотря на имеющиеся допущения, проведенное исследование однозначно позволяет утверждать, что повреждение лесов сибирским шелкопрядом приводит к значительному перераспределению углерода из живой фитомассы в мертвую, меняя роль леса в процессе глобальных климатических изменений, превращая его из поглотителя углерода в источник.

Принимая во внимание скорости разложения КДО, можно прогнозировать, что в течение ближайших десятилетий шелкопрядники будут являться источником выбросов углерода.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение коллективом научной лаборатории Защита леса проекта «Методологические основы оценки лесопатологических рисков в насаждениях юга Средней Сибири» (№ FEFE-2024-0016).*

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Harris N. L., Gibbs D. A., Vaccini A. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*. 2021. V. 11. P. 234–240. DOI 10.1038/s41558-020-00976-6.
2. Bellassen V., Luyssaert S. Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times. *Nature*. 2014. V. 506. P. 153–155. DOI 10.1038/506153a.
3. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. FAO: Rome, 2020. DOI 10.4060/ca9825en.
4. Филипчук А. Н., Малышева Н. В., Золина Т. А., Югов А. Н. Бореальные леса России: возможности для смягчения изменения климата. Лесохозяйственная информация. 2020. № 1. С. 92–113. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10.
5. Глобальное изменение климата и Сибирский федеральный округ. На пути к адаптации. Климатический центр Росгидромета. СПб. : Наукоемкие технологии, 2021. 12 с.
6. Суховольский В. Г., Ковалев А. В., Пальникова Е. Н., Тарасова О. В. Моделирование рисков воздействия насекомых на лесные насаждения при возможных климатических изменениях. Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8, № 2. С. 241–253. DOI 10.20537/2076-7633-2016-8-2-241-253.
7. Jactel H., Koricheva J., Castagneyrol B. Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Current Opinion in Insect Science*. 2019. V. 35. P.103–108. DOI 10.1016/j.cois.2019.07.010.
8. Pureswaran D. S., Roques A., Battisti A. Forest Insects and Climate Change. *Current Forestry Reports*. 2018. V. 4. P. 35–50. DOI 10.1007/s40725-018-0075-6.
9. Исаев А. С., Ершов Д. В., Лупян Е. А., Кобельков М. Е. Особенности организации спутникового мониторинга массового размножения вредных насекомых в лесах Сибири. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т. 1. С. 164–174.

10. Ершов Д. В., Ковганко К. А., Сочилова Е. Н. ГИС-технология оценки пирогенных эмиссий углерода по данным Terra-MODIS и государственного учета лесов. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 2. С. 365–372.
11. Лукина Н. В., Барталев С. А., Лупян Е. А., Курбатова Ю. А., Ершов Д. В., Курганова И. Н., Шанин В. Н., Тебенькова Д. Н., Данилова М. А., Гераськина А. П., Тихонова. Е. В., Горнов А. В., Шевченко Н. Е. Создание национальной системы мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах России. Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: сб. науч. ст. по материалам VIII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 300-летию Российской академии наук и 35-летию Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. Апатиты : Изд. ФИЦ КНЦ РАН, 2024. С. 35–36.
12. Слинкина О. А. Определение состояния темнохвойных лесов, поврежденных энтомофагами, по спутниковым данным. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 2. С. 51–61. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-51-61.
13. Рожков А. С. Сибирский шелкопряд. М.: АН СССР, 1963. 175 с.
14. Кириченко Н. И., Баранчиков Ю. Н. Кормовые нормы гусениц сибирского шелкопряда на хвойных породах Сибири. Сибирский экологический журнал. 2008. Т. 5. С. 709–716.
15. Журавлев Г. П. Рекомендации по надзору за сибирским шелкопрядом в лесах Дальнего Востока. Хабаровск : ДальНИИЛХ, 1960. 33 с.
16. Гродницкий Д. Л., Разнобарский В. Г., Солдатов В. В., Ремарчук Н. П. Деградация древостоев в таёжных шелкопрядниках. Сибирский экологический журнал. 2002. № 1. С. 3–12.
17. Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchyk V., Dmitriev E., Martynenko O., See L. and Kraхner F. Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests. *Forests*. 2018. V. 9, Iss. 6. 312. P. 1–23. DOI 10.3390/f9060312.
18. Уткин А. И., Замолотчиков Д. Г., Пряжников А. А. Методы определения депонирования углерода фитомассы и нетто-продуктивности лесов (на примере Республики Беларусь). *Лесоведение*. 2003. № 1. С. 48–57.
19. Фуряев В. В. Шелкопрядники тайги и их выжигание. М. : Наука, 1966. 92 с.
20. Исаев А. С. Программа чрезвычайных мер биологического контроля насекомых-вредителей в лесах Красноярского края. Отчет по проекту Всемирного банка Loan 3806-RU. М., 1997. 151 с.
21. Стороженко В. Г. Структуры древесных фракций и объемы компонентов древесины еловых биогеоценозов тайги европейской России. *Сибирский лесной журнал*. 2022. № 2. С. 29–40. DOI 10.15372/SJFS20220204.
22. Russell M. B., Woodall C. W., Fraver S., D'amato A. W., Domke G. M., Skog K. E. Residence times and decay rates of downed woody debris biomass/carbon in eastern US forests. *Ecosystems*. 2014. V. 17. P. 765–777. DOI 10.1007/s10021-014-9757-5.
23. Капица Е. А., Трубицына Е. А., Шорохова Е. В. Биогенный ксилолиз стволов, ветвей и корней лесобразующих пород темнохвойных северотаежных лесов. *Лесоведение*. 2012. № 3. С. 51–58.
24. Shorohova E., Kapitsa E. The decomposition rate of non-stem components of coarse woody debris (CWD) in European boreal forests mainly depends on site moisture and tree species. *European Journal of Forest Research*. 2016. V. 135. P. 593–606. DOI 10.1007/s10342-016-0957-8.
25. Краснощеков Ю. Н., Вишнякова З. В., Перевозникова В. Д., Баранчиков Ю. Н. Эколого-биологические особенности почв шелкопрядников в южной тайге Средней Сибири. *Известия АН. Серия биологическая*. 2003. № 5. С. 623–631. DOI 10.1023/A:1025811022200.
26. Загребев В. В., Сухих В. И., Швиденко А. З., Гусев Н. Н., Мошкалев А. Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М. : Колос, 1992. 495 с.

## REFERENCES

1. Harris N. L., Gibbs D. A., Vaccini A. et al. (2021) Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 11, 234–240. DOI 10.1038/s41558-020-00976-6.
2. Bellassen V., Luysaert S. (2014) Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times. *Nature*, 506, 153–155. DOI 10.1038/506153a.

3. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report.* (2020) FAO: Rome. DOI 10.4060/ca9825en.
4. Filipchuk A. N., Malysheva N. V., Zolina T. A., Yugov A. N. (2020) Boreal forests of Russia: opportunities for climate change mitigation. *Lesohozyajstvennaya informaciya [Lesohoz. Inform.]*, 1, 92–113. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10. [in Russian].
5. Global climate change and the Siberian Federal District. Towards adaptation (2021) *Klimaticheskij centr Rosgidrometa [Climate Center of Roshydromet]*. St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2021. [in Russian].
6. Soukhovolsky V. G., Kovalev A. V., Palnikova E. N., & Tarasova O. V. (2016). Modelling the risk of insect impacts on forest stands after possible climate changes. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie [Computer Studies and Modelling]*, 8(2), 241–253. DOI 10.20537/2076-7633-2016-8-2-241-253 [in Russian].
7. Jactel H., Koricheva J., Castagneyrol B. (2019) Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, 35, 103–108. DOI 10.1016/j.cois.2019.07.010
8. Pureswaran D. S., Roques A., Battisti A. (2018) Forest Insects and Climate Change. *Current Forestry Reports*, 4, 35–50. DOI 10.1007/s40725-018-0075-6.
9. Isaev A. S., Ershov D. V., Lupyan E. A., Kobelkov M. E. (2004) Features of the organization of satellite monitoring of mass reproduction of harmful insects in the forests of Siberia. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]*, 1, 164–174. [in Russian].
10. Ershov D. V., Kovganko K. A., Sochilova E. N. (2009) GIS technology for assessing pyrogenic carbon emissions based on Terra-MODIS and state forest inventory data. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]*, 2, 365–372. [in Russian].
11. Lukina N. V., Bartalev S. A., Lupyan E. A., Kurbatova Yu. A., Ershov D. V., Kurganova I. N., Shanin V. N., Tebenkova D. N., Danilova M. A., Geraskina A. P., Tikhonova. E. V., Gornov A. V., Shevchenko N. E. (2024) Creation of a national system for monitoring carbon pools and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems of Russia. *Ekologicheskie problemy severnyh regionov i puti ih resheniya: sb. nauch. st. po materialam VIII Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 300-letiyu Rossijskoj akademii nauk i 35-letiyu Instituta problem promyshlennoj ekologii Severa KNC RAN [Environmental problems of the northern regions and ways to solve them: Proceedings of the VIII All-Russian scientific conference with international participation dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences and the 35th anniversary of the Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Center of the RAS]*. (pp. 35–36). Apatity: Изд. FRC KSC RAS Publ. [in Russian].
12. Slinkina O. A. (2024). Determining the state of dark coniferous forests damaged by insect pests according to satellite data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 29(2), 51–61. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-51-61 [in Russian].
13. Rozhkov A.S. (1963) *Sibirskij shelkopryad [Siberian silkworm]*. Moscow: USSR AS Publ., 175 p. [in Russian].
14. Kirichenko N.I., Baranchikov Yu.N. (2008) Withdrawn Food Rate for the Larvae of Siberian Moth on the Conifers of Siberia. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]*, 5, 709–716. [in Russian].
15. Zhuravlev G.P. (1960) *Rekomendacii po nadzoru za sibirskim shelkopryadom v lesah Dal'nego Vostoka [Recommendations for the Monitoring of the Siberian Silkworm in the Forests of the Far East]* Khabarovsk: Far Eastern Research Institute of Forestry Publ., 33 p. [in Russian].
16. Grodnitsky D. L., Raznobarsky V. G., Soldatov V. V., Remarchuk N. P. Degradation of Forest Stands in Taiga Silkworm Forests. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal (App.1) [Contemporary Problems of Ecology (Pril.1)]*, 1, 3–12. [in Russian].
17. Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchik V., Dmitriev E., Martynenko O., See L. and Kraxner F. (2018) Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests. *Forests*, 9(6), 312, 23 p. DOI 10.3390/f9060312.

18. Utkin A. I., Zamolodchikov D. G., Pryazhnikov A. A. (2003) Methods for Determining Carbon Sequestration of Phytomass and Net Productivity of Forests (a case study of the Republic of Belarus). *Lesovedenie [Forestry]*, 1, 48–57. [in Russian].
19. Furyaev V. V. (1966). *Shelkopryadniki taygi i ikh vyzhiganie [Forests that Died after Siberian Silk Moth Outbreaks and Their Prescribed Burning]*. Moscow: Nauka Publ., 92 p. [in Russian].
20. Isaev A. S. (1997) Program of Emergency Measures for Biological Control of Insect Pests in the Forests of Krasnoyarsk Krai. *Otchet po proektu Vsemirnogo banka Loan 3806-RU [Report on the World Bank Project Loan 3806-RU]*. Moscow, 151 p. [in Russian].
21. Storozhenko V. G. (2022) Structures of wood fractions and volumes of wood components in spruce biogeocenoses of the taiga of European Russia. *Sibirskij Lesnoj Zurnal [Sib. J. For. Sci.]*, 2, 29–40. DOI 10.15372/SJFS20220204 [in Russian].
22. Russell M. B., Woodall C. W., Fraver S., D'amato A. W., Domke G. M., Skog K. E. (2014) Residence times and decay rates of downed woody debris biomass/carbon in eastern US forests *Ecosystems*, 17, 65–777. DOI 10.1007/s10021-014-9757-5.
23. Kapitsa E. A., Trubitsyna E. A., Shorokhova E. V. (2012) Biogenic xylolysis of trunks, branches and roots of forest-forming species of dark coniferous northern taiga forests. *Lesovedenie [Forestry]*, 3, 51–58. [in Russian].
24. Shorohova E., Kapitsa E. (2016) The decomposition rate of non-stem components of coarse woody debris (CWD) in European boreal forests mainly depends on site moisture and tree species. *European Journal of Forest Research*, 135, 593–606. DOI 10.1007/s10342-016-0957-8.
25. Krasnoshchekov Y. N., Vishnyakova Z. V., Perevoznikova V. D. et al. (2003) Ecological and Biological Features of Soils in Fir Forests Defoliated by the Siberian Moth in the Southern Taiga Subzone of Middle Siberia. *Izvestiya AN. Seriya biologicheskaya [Biology Bulletin]*, 5, 623–631. DOI 10.1023/A:1025811022200 [in Russian].
26. Zagreev V. V., Sukhikh V. I., Shvidenko A. Z., Gusev N. N., Moshkalev A. G. (1992) *Obshcheyuznyye normativy dlya taksatsii lesov [All-Union standards for forest inventory]*. Moscow: Kolos Publ., 495 p. [in Russian]

### Об авторах

Ольга Александровна Слинкина – старший научный сотрудник научной лаборатории Защита леса.

Павел Владимирович Михайлов – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник научной лаборатории Лесных экосистем.

Денис Александрович Демидко – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научной лаборатории Защита леса.

### Author details

*Olga A. Slinkina* – Senior Researcher, Scientific Laboratory of Forest Health.

*Pavel V. Mikhailov* – PhD, Associate Professor, Leading Researcher, Scientific Laboratory of Forest Ecosystems.

*Denis A. Demidko* – PhD, Senior Researcher, Scientific Laboratory of Forest Health.

Получено / Received 10.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 16.01.2026

Принята к публикации / Accepted 04.02.2026