

УДК 630\*114.6+574.4

## ВЛИЯНИЕ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАСПАДА ДРЕВОСТОЯ НА УГЛЕРОДНЫЙ ОБМЕН ЕЛОВЫХ ЛЕСОВ

© 2020 г. Д. В. Карелин<sup>1,2,\*</sup>, Д. Г. Замолодчиков<sup>2</sup>, А. В. Шилкин<sup>3</sup>, А. С. Куманяев<sup>4</sup>,  
С. Ю. Попов<sup>4</sup>, Н. О. Тельнова<sup>1</sup>, М. Л. Гитарский<sup>5</sup>

Представлено академиком РАН В. М. Котляковым 07.04.2020 г.

Поступило 08.04.2020 г.

После доработки 14.04.2020 г.

Принято к публикации 20.04.2020 г.

Многолетнее воздействие распада древостоя ели на углеродный баланс изучали в таежных лесах Валдая (Новгородская обл.). Оценивали эмиссию  $\text{CO}_2$  из почвы, дыхание древесного дебриса, валовое дыхание, нетто-поток  $\text{CO}_2$  и водяного пара. Гибель древостоя еловых насаждений в результате воздействия ксилофагов и сапротрофов, а также ветровалов не приводит к снижению удельного валового дыхания на таких участках. Это связано с тем, что сокращение выделения  $\text{CO}_2$  от дыхания живых деревьев компенсируется приростом эмиссии от валежа, а также резким (3–3.5 кратным) и продолжительным (не менее 6 лет) увеличением дыхания почвы под сухостоем елей (“hotspots”). Вклад в поток валового дыхания с единицы площади погибшего елового древостоя из почвы под сухостоем (14.4%) превышает вклад разложения крупного древесного дебриса (9%). За период наблюдений отмечено трехкратное снижение годового нетто-стока  $\text{CO}_2$  с  $-300$  до  $-95$  гС  $\text{м}^{-2}$  год $^{-1}$ , которое сопровождается снижением эвапотранспирации ( $0.0116$  г  $\text{H}_2\text{O}$   $\text{м}^{-2}$  сек $^{-1}$ ; май–октябрь 2018) по сравнению с аналогичным периодом 2010 г. ( $0.0142$  г  $\text{H}_2\text{O}$   $\text{м}^{-2}$  сек $^{-1}$ ). Наблюдаемое снижение нетто-поглощения связано как с ростом валового дыхания в результате увеличения площадей с распавшимся древостоем, так и со снижением первичной продукции елей. Дальнейшее увеличение площади распада древостоя до 27% превращает нетто-баланс еловой тайги в источник  $\text{CO}_2$  для атмосферы, что можно учитывать при дистанционных прогнозах.

**Ключевые слова:** тайга, *Picea abies*, эмиссия  $\text{CO}_2$  из почвы, нетто-баланс углерода, сухостой, валеж, ветровал, ксилофаги, экстремальные погодные явления, изменения климата

DOI: 10.31857/S2686739720070087

В современной биосфере, несмотря на растущее антропогенное влияние, связанное с землепользованием, леса остаются одним из важнейших регуляторов газового состава атмосферы и альбедо, что имеет прямое влияние на климат [1]. Важнейшей структурно-функциональной компонентой лесов, в том числе бореальных, фито-

масса которых составляет 14.9% от лесов мира [2], является древостой. Он определяет характерные скорости продукции и разложения органических веществ на лесных территориях, а также содержание органического углерода в почвах лесной экосистемы. Поэтому вопросы, связанные с климатическим (в том числе антропогенно обусловленным) или прямым антропогенным влиянием на С-баланс лесных экосистем через состояние их древостоя, относятся к важнейшим в области глобальной экологии.

В основу исследования положен ряд многолетних (с 2009 г. по н.в.) наблюдений за таежными экосистемами полигона Валдайского филиала Государственного гидрологического института Росгидромета (Новгородская обл.,  $57^{\circ}57'43.0''$  с.ш.,  $33^{\circ}20'19.4''$  в.д., 225.8 м н.у.м.). Подробнее изучаемые экосистемы и методы исследований описаны в коллективной монографии [3]. Преобладают перестойные высокобонитетные еловые леса на

<sup>1</sup> Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

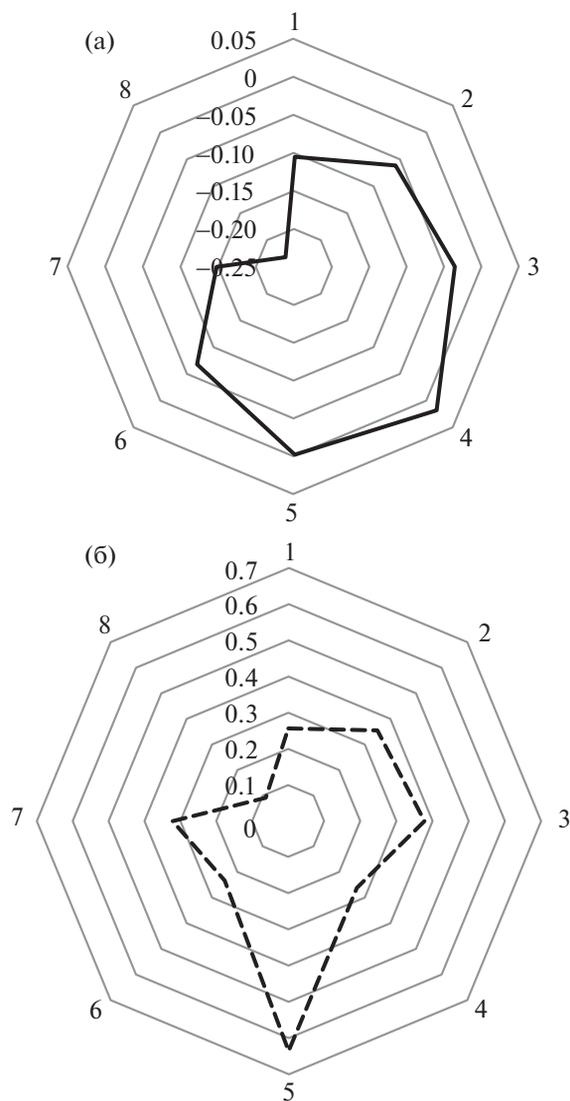
<sup>2</sup> Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup> НПО “Тайфун” Росгидромета Российской Федерации, Обнинск, Калужская область, Россия

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>5</sup> Филиал “Угреша” Университета “Дубна”, Дзержинский, Московская область, Россия

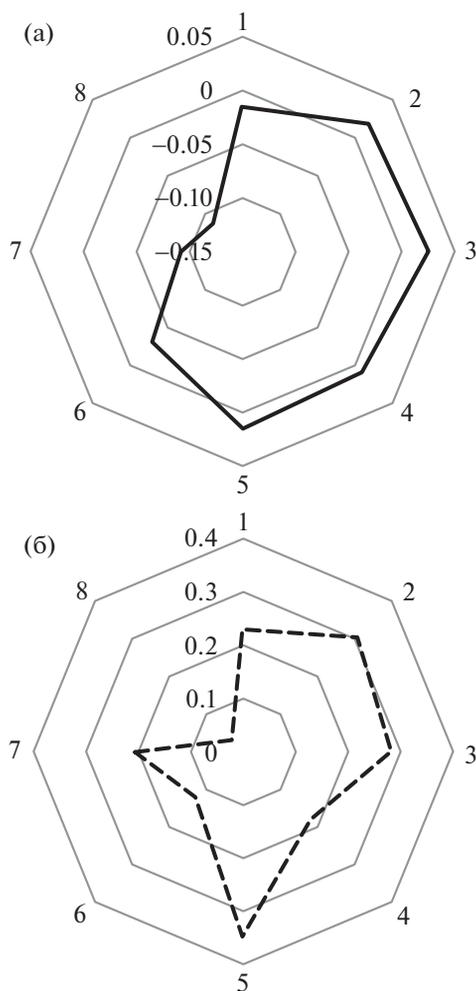
\*E-mail: dkarelin7@gmail.com



**Рис. 1.** Средний нетто-поток углерода ( $\text{mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ ,  $N = 6475$ ) с мая по октябрь 2010 (а), и (б) доля площади, занятая усыхающим еловым древостоем и безлесными участками по направлениям ветра (1 – север, 2 – северо-восток, ... 8 – северо-запад) в зоне от 40 до 300 м от автоматической пульсационной установки. Отрицательные величины нетто-потока обозначают сток  $\text{C-CO}_2$  из атмосферы, положительные – источник.

моренных отложениях с присутствием сосны и березы при максимальной высоте древостоя до 40 м. Для исследуемого полигона характерны массовые ветровалы сухостоя елей, погибших в 2010–2013 гг. в результате атак ксилофагов (в частности, *Ips tyrographus* L) и грибных гнилей. Это усыхание относится к последней общеевропейской вспышке массовой гибели елей [4]. Наиболее существенное ослабление древостоя произошло после аномальной летней засухи 2010 г., которую часто рассматривают как проявление глобального потепления климата [5, 6]. За 2009–2016 гг. запас крупного древесного дебриса на полигоне увеличился втрое, тогда как запас живой древесины снизился от 572 до 312  $\text{m}^3 \text{ га}^{-1}$  [3].

Было оценено влияние прогрессирующего распада древесного яруса на основные показатели  $\text{C}$ -цикла таежного леса, в частности, почвенную эмиссию, валовое дыхание и нетто-поток  $\text{CO}_2$ . В качестве основы для их площадной оценки использовали зону отклика (т.н. “футпринт”) автоматической пульсационной установки (АПУ) для измерения потоков  $\text{CO}_2$  и паров воды. При высоте размещения оборудования 42 м над поверхностью почвы и 5 м над пологом леса максимальный радиус “футпринта” оценен как 500 м, при площади 0.785  $\text{km}^2$  [3, 7]. На постоянных пробных площадях и трансектах измеряли запасы основных резервуаров древесины и надземной фитомассы, а также потоки  $\text{CO}_2$  от крупного дре-



**Рис. 2.** Средний нетто-поток углерода ( $\text{mg C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ ,  $N = 7677$ ) с мая по октябрь 2018 (а), и (б) доля площади, занятая усыхающим еловым древостоем и безлесными участками в зоне от 30 до 350 м от автоматической пульсационной установки. Отрицательные величины нетто-потока обозначают сток  $\text{C-CO}_2$  из атмосферы, положительные — источник.

весного дебриса (валежа и сухостоя), а также из почвы.

За период наблюдений увеличилась как общая доля участков с ослабленным или поврежденным древостоем ели (с 5 до 30%), так и средняя на единицу площади эмиссия  $\text{CO}_2$  из почвы на участках с распадом древостоя: на 16.5% в 2014 г. и на 19% в 2017 г. Дополнительная эмиссия связана с повышенными выбросами углекислого газа из почвы вокруг сухостойных елей на расстоянии не более 0.5 м от стволов [8, 9]. Этот эффект обнаруживается через 1–2 года после гибели дерева и поддерживается на постоянном уровне не менее 6 лет. Степень усиления эмиссии  $\text{CO}_2$  рядом с сухостоем, по сравнению с межстволовыми участками, составляет высокую и достаточно постоянную величину (3–3.5 раза), которая мало меняется от года к году. Механизм явления остается до конца не ясен. Наиболее вероятно это связано с повышен-

ной активностью грибов-ксилотрофов и с облегченным транспортом газа в прикорневой зоне почвы под сухостоем. Вторым дополнительным слагаемым эмиссии  $\text{CO}_2$  на участках распада древостоя является эмиссия от разложения растущего запаса валежа. В общий поток валового дыхания на этих участках может входить дыхание сохранившихся живых деревьев. Для сравнения уровней валового дыхания (ВД) леса, не затронутого усыханием, и на участках с полным распадом древостоя были рассчитаны величины основных слагаемых ВД, включая эмиссию из почвы (с подстилкой) на межстволовых участках, в пристволовых зонах сухостоя, от крупного древесного дебриса и живых деревьев. На участках распада древостоя наибольший вклад в суммарный поток  $815 \pm 24.6 \text{ г C m}^{-2} \text{ год}^{-1}$  предоставлен почвой межстволовых участков (76.6%), на втором месте находится вклад зон почвы под сухостоем (14.4%),

на третьем – эмиссия от валежа (9%). В незатронутым усыханием ельнике на втором месте по участию в ВД после эмиссии из почвы находится вклад дыхания живого древостоя. Согласно блоковой модели, суммарный поток ВД в здоровом лесу меняется в пределах  $922.1–970.7 \text{ гС м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ . Отметим, что на участках распада древостоя вклад эмиссии от разложения дробриса существенно зависит от его количества и плотности. Так, по нашим ранним оценкам ВД на модельных участках распада древостоя в 2013 г. составило  $1480 \text{ гС м}^{-2} \text{ год}^{-1}$  [3]. Поэтому полученное различие между ВД участка распада и незатронутым усыханием ельника нельзя считать существенным. Убыль дыхания автотрофов при усыхании древостоя компенсируется увеличением дыхания гетеротрофов на сходную величину.

Для С-баланса леса в целом важно, что участки распада длительно функционируют как источник углерода, занимая при этом значительную территорию. Оценить их вклад для большой площади можно с помощью пульсационного метода. Как показывает сравнение оценок годового нетто-баланса С в период наиболее активной деградации елового древостоя, в 2010–2011 гг. баланс в экосистеме составил  $-300 \text{ гС-СО}_2 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$  (сток С из атмосферы), тогда как в 2018 г. сток снизился до  $-95 \text{ гС-СО}_2 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ . Это произошло не только в результате роста валового дыхания, но и снижения первичной продукции ослабленного елового древостоя, что подтверждается значимым падением эвапотранспирации за май–октябрь в сравниваемые годы;  $0.0142 \pm 0.0003 \text{ гН}_2\text{О м}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  ( $n = 6475$ ) в 2010 г. и  $0.0116 \pm 0.0002 \text{ гН}_2\text{О м}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  ( $n = 7677$ ) в 2018 г. (отличия значимы: медианный тест,  $p = 0.027$ ).

Сопоставление средних величин нетто-поток С по секторам направлений ветра по данным АПУ с мая по октябрь 2010 и 2018 гг. с присутствием в этих секторах различных биотопов показало, что наибольшая положительная корреляция отмечается между источником С и площадями, занятыми усыхающим еловым древостоем и безлесными участками в пределах от 30–40 до 300–350 м от измерительной установки (рис. 1, 2). При этом в 2018 г. эта связь становится значимой ( $r_p = +0.77$ ,  $p = 0.026$ ).

Таким образом, прогрессирующее ослабление и гибель елового древостоя, связанное с современным потеплением, приводит к трехкратному снижению стока С на значительных территориях, несмотря на сопровождающие этот процесс восстановительные сукцессии. Снижение стока связано с сохранением величины валового дыхания на фоне снижения продукции. Расчеты показывают, что увеличение площади полного распада древостоя до 27% превращает территорию боре-

ального леса в источник  $\text{CO}_2$  для атмосферы, что может быть использовано при дистанционных оценках влияния климатических или антропогенных воздействий на С-баланс лесов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность директору Валдайского филиала ГГИ А.С. Маруничу, профессору д.б.н. В.А. Мухину (ИЭРиЖ РАН, Екатеринбург), к.т.н. Лопесу де Гереню (ИФХиБПП РАН, Пушкино-на-Оке), А.И. Иващенко (биологический ф-т МГУ им. М.В. Ломоносова), а также студентам биологического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ № 18–17–00178 (полевые исследования 2018 г.) и РНФ № 19–77–30015 (анализ данных 2019 г.), а также тем госзадания № 0148–2019–0006 (обработка данных по эмиссии  $\text{CO}_2$  из почвы) и № АААА–А19–119022190168–8 (анализ космических снимков) Института географии РАН и № АААА–А18–118052590019–7 Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (расчеты по данным лесоустройства).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bonan G.B. // Science. 2008. V. 320. P. 1444–1449.
2. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O., Jackson R.B. // Ann. Rev. Ecol. Evolution and Systematics. 2013. V. 44. P. 593–622.
3. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах / Ред. Д.Г. Замолотчиков, Д.В. Карелин, М.Л. Гитарский, В.Г. Блинов. Саратов: Амрит. 2017. 279 с.
4. Štursová M., Šnajdr J., Cajthaml T., Bárta J., Šantrůčková H., Baldrian P. // ISME Journal. 2014. V. 8. P. 1920–1931.
5. Данилов-Даниэлян В.И. // Экология и жизнь. 2010. № 10. С. 20–27.
6. Мохов И.И., Семенов В.А. // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 16–28.
7. Замолотчиков Д.Г., Гитарский М.Л., Шилкин А.В., Марунич А.С., Карелин Д.В., Блинов В.Г., Иващенко А.И. // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. № 1. С. 54–68.
8. Карелин Д.В., Замолотчиков Д.Г., Исаев А.С. // ДАН. 2017. Т. 475. № 4. С. 473–476.
9. Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолотчиков Д.Г. // Известия РАН. Сер географическая. 2017. № 2. С. 60–68.

## THE LONG-TERM EFFECT OF ONGOING SPRUCE DECAY ON CARBON EXCHANGE IN TAIGA FORESTS

D. V. Karelin<sup>a,b,#</sup>, D. G. Zamolodchikov<sup>b</sup>, A. V. Shilkin<sup>c</sup>, A. S. Kumanyaev<sup>d</sup>, S. Yu. Popov<sup>d</sup>,  
N. O. Tel'nova<sup>a</sup>, and M. L. Ginarskiy<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup> Center for Forest Ecology and Productivity Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>c</sup> Tayphoon Research and Production Association of the Roshydromet, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation

<sup>d</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

<sup>e</sup> Dubna State University, Ugresha Branch, Dzerzhinskiy, Moscow region, Russian Federation

#E-mail: dkarelin7@gmail.com

Presented by Academician of the RAS V. M. Kotlyakov April 7, 2020

The long-term effect of spruce stand decay on CO<sub>2</sub> emission from soil, coarse woody debris, net fluxes of CO<sub>2</sub> and water vapor were investigated in taiga forests (north of the European Russia). The decay does not lead to noticeable decrease in specific gross respiration in areas of active tree decay, because the reduced CO<sub>2</sub> respiration of live trees was compensated by emission from coarse woody debris and soil respiration (hotspots) under dry standing spruce trees. The contribution to carbon emissions per unit of area in dead spruce stands from soil hotspots under dry standing trees was greater than the input of decomposition of coarse woody debris. During the observation period the studied area demonstrated significant decrease in annual net CO<sub>2</sub> sink from  $-300$  to  $-95$  gC m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>, which is mostly due to progressive tree mortality. This is followed by reduced evapotranspiration ( $0.0142 > 0.0116$  gH<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) from May to October, 2018, compared with 2010. We assume that the observed decrease in carbon uptake is due to both a reduction in primary productivity and the increase in gross respiration from expanded areas of declined spruce stands. The subsequent increase of the decay area to 27 per cent will convert the spruce taiga forest into net source of the CO<sub>2</sub>. The latter should be accounted for in carbon budget projections.

*Keywords:* boreal forest, *Picea abies*, CO<sub>2</sub> soil emission, carbon net exchange, deadwood, coarse woody debris, wind throw, xylophages, extreme weather events, climate change