

Потоки CO₂ на сплошной вырубке в южной тайге европейской территории России

В. В. МАМКИН¹, В. К. АВИЛОВ¹, Д. Г. ИВАНОВ¹, А. В. ОЛЬЧЕВ^{1, 2}, Ю. А. КУРБАТОВА¹

¹Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН
119071, Москва, Ленинский просп., 33
E-mail: vadimmamkin@gmail.com

²Географический факультет, Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
119991, Москва, Ленинские горы, ГСП-1

Статья поступила 13.09.2018

После доработки 02.01.2019

Принята к печати 07.03.2019

АННОТАЦИЯ

Нарушение лесного покрова в результате сплошных вырубок (СВ) приводит к трансформации естественных для лесных экосистем биогеохимических процессов, определяющих основные потоки парниковых газов, прежде всего CO₂, между экосистемами и атмосферой. Изменения в газообмене CO₂ из-за СВ значительно варьируют в зависимости от местных природных и климатических условий. Данное исследование направлено на оценку динамики чистого экосистемного обмена CO₂ (NEE), валовой первичной продукции (GPP), экосистемного дыхания (TER) и дыхания почвы на СВ в условиях южной тайги европейской части РФ. Результаты базируются на данных непрерывных экспериментальных наблюдений, полученных с помощью метода турбулентных пульсаций в течение двух вегетационных периодов (2016 и 2017 гг.) Показано, что СВ в течение первых двух лет естественного восстановления является источником CO₂ для атмосферы (NEE с мая по октябрь составило 553,3 г С·м⁻² в 2016 г. и 193,3 г С·м⁻² в 2017 г.). Межгодовая динамика кумулятивных сумм NEE определялась ростом GPP (777,5 г С·м⁻² в 2016 г. и 1020,5 г С·м⁻² в 2017 г.) и снижением TER (1330,9 г С·м⁻² в 2016 г. и 1213,7 г С·м⁻² в 2017 г.).

Результаты камерных измерений показали, что в полуденные часы летних месяцев дыхание почвы на различных участках сплошной вырубки изменялось от $3,6 \pm 0,7$ до $11,8 \pm 3,0$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹ в 2016 г. и от $6,0 \pm 1,3$ до $14,8 \pm 3,5$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹ в 2017 г. Оценки кумулятивных потоков GPP на СВ в южно-таежной подзоне европейской части РФ превышают оценки GPP, полученные ранее на основе наблюдений по аналогичной методике в условиях бореальных и неморальных лесов.

Ключевые слова: сплошная вырубка, потоки CO₂, углеродный цикл, южная тайга, NEE, TER, GPP.

Бореальные леса играют ведущую роль в регуляции климата планеты, являясь важнейшим звеном глобальных циклов превращения энергии и вещества. Удаление лесного полога в результате сплошных вырубок (СВ) приводит к изменению свойств деятельного слоя (т. е. слоя почвы растительно-

сти или воды, тепловое состояние которого обуславливается радиационными процессами и процессами теплообмена с атмосферой, а температура его испытывает суточные и годовые колебания [Хромов, Мамонтова, 1974]) и, как следствие, к трансформации структуры радиационного и теплового балансов, ми-

кроклиматических условий, смене состава растительных сообществ и нарушению естественных биогеохимических циклов, прежде всего, цикла углерода [Keenan, Kimmins, 1993]. Резкое уменьшение в результате рубки фотосинтезирующей биомассы способно существенно нарушить функцию лесов по депонированию атмосферного CO_2 . Увеличение площади рубок может привести к значительным нарушениям устоявшихся связей между компонентами климатической системы как в локальном, так и в глобальном масштабе [Schulze et al., 2000; Rodrigues, Pita, 2011; Matthews et al., 2017]. Оценка влияния СВ на потоки CO_2 между лесными экосистемами и атмосферой является важнейшей задачей для улучшения качества прогноза климата и разработки стратегий рационального землепользования [Pongratz et al., 2009; Aguilos et al., 2014].

Исследованию влияния СВ на потоки CO_2 между лесными экосистемами и атмосферой в последние годы был посвящен ряд работ на основе анализа экспериментальных данных, полученных с применением метода турбулентных пульсаций [Kowalski et al., 2003; Amiro et al., 2010; Grant et al., 2010; Williams et al., 2014; Paul-Limoges et al., 2015]. Полученные результаты выявили, что СВ в первые годы после удаления лесного полога является источником CO_2 для атмосферы. Время восстановления экосистемы СВ в качестве стока CO_2 значительно варьирует в зависимости от местных климатических условий, состава растительности и типа почв. Как правило, лесная экосистема становится источником CO_2 для атмосферы после СВ леса вследствие резкого уменьшения валовой первичной продукции (GPP), при незначительных изменениях экосистемного дыхания (TER). По результатам исследования, проведенного S. Coursolle et al. [2012] на основе данных, полученных в экосистемах зрелых и нарушенных хвойных лесах Канады, показано, что баланс CO_2 нарушенных экосистем ранних лет зарастания зависит преимущественно от видового состава и структуры фитоценоза, а также динамики листового индекса (LAI), в то время как изменчивость компонентов баланса CO_2 экосистем, представленных зрелыми древостоями, зависит в основном от динамики параметров окружающей среды, таких как длина

вегетационного периода, влажность и температура почвы.

Леса России ежегодно поглощают, по разным оценкам, от 200 до 500 млн тонн CO_2 из атмосферы [FAO, 2011; Zamolodchikov et al., 2017]. Согласно данным [Zamolodchikov et al., 2017], площадь вырубок в России выросла с 0,684 млн га в 2001–2007 гг. до 1,024 млн га в период с 2008 по 2014 г.

В отечественной научной литературе можно найти ряд работ, посвященных экологическим последствиям сплошной рубки леса, в основном связанных с изучением динамики сукцессий, изменению свойств почв и проблемам лесовосстановления [Уланова и др., 2005; Иванова, Быстрой, 2010; Рыбальченко, Цареградский, 2011]. На сегодняшний день большая часть результатов исследований потоков CO_2 между экосистемами вырубок и атмосферой получена в Северной Америке (США, Канада). Экспериментальные данные о потоках CO_2 на вырубках в зоне бореальных лесов в России все еще носят крайне ограниченный характер (см., например, [Machimura et al., 2005; Кузнецов, 2017; Молчанов и др., 2017; Ольчев и др., 2017]).

Цель настоящего исследования – оценка динамики обменных с атмосферой экосистемных потоков CO_2 на СВ в подзоне южной тайги европейской части РФ в течение двух вегетационных периодов после полного удаления лесного полога. Также в работе рассмотрены зависимости потоков CO_2 от суммарной солнечной радиации, температуры воздуха и почвы.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Объект. Объектом данного исследования является СВ площадью 4,5 га, расположенная в зоне рационального природопользования Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника (ЦЛГПБЗ) в Тверской области на юго-западе Валдайской возвышенности (56,4435° с. ш., 33,0478° в. д., 250 м над уровнем моря (ур. м.)) Территория заповедника достаточно удалена от каких-либо источников антропогенного загрязнения и относится к атлантико-континентальной европейской области умеренного климатического пояса [Алисов, 1956; Ольчев и др., 2017].

По данным долгосрочных метеорологических измерений на ближайшей к объекту

исследования (расстояние до вырубki 5 км) сетевой метеорологической станции «Заповедник» в период с 1963 по 2016 г. средняя годовая температура воздуха на высоте 2 м составила +4,3 °С, средняя температура января –8,5 °С, июля +15,1 °С, а средняя годовая сумма осадков – 720 мм. Снежный покров на территории заповедника, как правило, формируется в середине ноября, а сходит в конце марта – начале апреля [Desherevskaya et al., 2010]. Гидротермический коэффициент Селянинова соответствует оптимуму произрастания еловых лесов и составляет 1,62 [Пузаченко и др., 2007].

Флора заповедника представлена типичными растительными сообществами южной тайги, в основном ельниками, значительную площадь территории занимают верховые сфагновые болота [Пузаченко и др., 2007; Ольчев и др., 2017].

Объект исследования расположен на хорошо дренируемом относительно ровном водораздельном участке. До вырубki леса в древесном ярусе растительного покрова преобладали ель европейская (*Picea abies*), береза повислая (*Betula pendula*) и осина (*Populus tremula*). Сплошная рубка леса была произведена в марте – апреле 2016 г. После завершения лесозаготовительных работ на вырубке оставлено большое количество пней, древесного опада и порубочных остатков [Ольчев и др., 2017]. Почвенный покров вырубki представлен дерново-подзолистыми почвами с относительным содержанием органического углерода в верхних 15 см от 2,7 до 5,8 % (образцы взяты в мае 2016 г.).

На момент начала эксперимента (начало апреля 2016 г.) на вырубке полностью отсутствовала фотосинтезирующая растительность. Восстановление растительного покрова началось во второй половине апреля. В июне 2016 г. в составе растительного покрова преобладали: звездчатка злаковая (*Stellaria graminea*), земляника лесная (*Fragaria vesca*) и кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella*). В конце июня на вырубке началось активное восстановление древесной растительности с преобладанием осины (*Populus tremula*). К середине августа средняя высота древесного подростa составляла 70–90 см, а значения LAI превысили 2,5 м²·м⁻².

В течение последующего зимнего периода (2016–2017 гг.) весь подрост над снежным покровом (около 1 м) был съеден лосем. В начале лета 2017 г. растительный покров представляли несколько типов сообществ. Среди подростa преобладала осина (*Populus tremula*), ольха черная (*Alnus glutinosa*), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*), клен остролистный (*Acer platanoides*); в подлеске – малина обыкновенная (*Rubus idaeus*); различные травы с преобладанием ясколки полевой (*Cerastium arvense*), земляники лесной (*Fragaria vesca*), гравилата речного (*Geum rivale*), ситника развесистого (*Juncus effusus*), таволги вязолистной (*Filipendula ulmaria*). Заращение вырубki в вегетационный период 2017 г. происходило в основном за счет травянистой растительности. Максимальные значения LAI в 2017 г. были достигнуты в середине июля и составили 4,5 м²·м⁻².

Методы. Измерительный комплекс (эколого-климатическая станция) установлен на вырубке непосредственно по завершении лесозаготовительных работ. В 2016 г. измерения проводили с 7 апреля по 19 октября, а в 2017 г. – с 5 мая по 27 октября. Комплекс оборудования полностью соответствовал стандартам, принятым на международной сети эколого-климатических станций FLUXNET [Burba et al., 2016]. Основные приборы размещены над поверхностью земли на металлической треноге. Акустический 3-компонентный анемометр Gill WindMaster Pro (Gill Instruments, UK) и газоанализатор открытого типа LI-7500A (LI-COR Inc., USA) были установлены на высоте 2,4 м. Данные о температуре и относительной влажности воздуха, атмосферном давлении, количестве осадков, а также о скорости и направлении ветра получены на высоте 2 м с помощью автоматической метеостанции WXT520 (Vaisala, Finland). Длинноволновая и коротковолновая радиация измерялись 4-компонентным радиометром NR01 (Hukseflux, Netherlands). Приборы для измерения потоков радиации размещали на высоте 1,9 м. Измерения потока тепла в почву проводили с помощью трех датчиков HFP-01SC (Hukseflux, Netherlands), установленных на глубине 5 см. Температуру и объемное влагосодержание верхних горизонтов почвы определяли на глубине 10 см в 4-кратной повторности с помощью рефлектметров CS655 (Campbell Sci. Inc., USA).

Расчет потока CO_2 (NEE) на основе данных наблюдений за пульсациями концентрации CO_2 и вертикальной скорости ветра выполнен согласно принятым в международной практике рекомендациям [Aubinet et al., 2012; Burba et al., 2016] с помощью программного обеспечения Eddy Pro (Li-cor inc., USA), с применением всех необходимых коррекций. Полученным значениям присваивался знак качества по 9-балльной шкале [Foken et al., 2004]. При расчетах потоков учитывалось изменение запасов (storage) CO_2 в столбе воздуха между датчиком и поверхностью почвы за соответствующие интервалы времени. Запасы CO_2 в столбе воздуха оценивали по изменению концентрации CO_2 на высоте размещения газоанализатора с помощью программного обеспечения Eddy Pro (LI-COR Inc., USA) согласно методике, описанной в [Migliavacca et al., 2009].

Данные, не соответствующие критерию качества (знак качества более 5), включающие значительные выбросы, полученные в условиях слаборазвитой турбулентности, а также при наличии на измерительных датчиках капель воды (роса, туман, осадки), исключались из дальнейшего рассмотрения. Фильтрация данных по критерию пороговых значений динамической скорости ветра (u^*), заполнение пропусков, а также расчет TER и GPP на основе NEE осуществлялись при помощи программного обеспечения ReddyProc [Wutzler et al., 2018]. За основу метода определения критерия u^* брали метод, предложенный [Papale et al., 2006]. Процедура заполнения пропусков и расчета TER и GPP основана на методах [Reichstein et al., 2005] и [Lasslop et al., 2010]. Разделение NEE на составляющие (TER и GPP) осуществлялось через аппроксимацию зависимости ночных значений NEE от температуры с применением уравнения Ллойда-Тейлора [Lloyd, Taylor, 1994] и дневных значений NEE от потока суммарной радиации с использованием световых кривых. При расчете TER и GPP соблюдалось равенство: $\text{NEE} = \text{TER} - \text{GPP}$. Неопределенность расчета TER в среднем составила $\pm 8\%$.

Для оценки дыхания почвы и контроля результатов расчета TER на основе данных измерений методом турбулентных пульсаций были организованы измерения потоков CO_2 с поверхности почвы камерным методом. Почвенное дыхание измеряли с использованием

полусферической прозрачной камеры из плексигласа диаметром 35 см и высотой 17 см, которая устанавливалась на круглые основания из ПВХ (5 оснований) диаметром 30 см, заблаговременно врезанных в почву на глубину 15 см с расстоянием 3–5 м друг от друга. Концентрацию газа в камере измеряли с частотой 1 Гц инфракрасным газоанализатором Li840 (Li-Cor Inc., USA), соединенным с камерой двумя трубками длиной 1,5 м. Время экспозиции камеры составляло 200 с. Подробное описание методики измерений почвенного дыхания приведено в [Ivanov et al., 2017]. Одновременно с определением концентрации CO_2 внутри камеры измерялась температура почвы на глубине 10 см (HI 98509 Checktemp 1, Hanna Instruments), воздуха внутри камеры (DHT22, SparkFun Electronics) и на высоте 30 см (ИВА-6, НПК «МИКРОФОР»). После завершения измерений, 31 августа, была отобрана вся растительность внутри оснований для определения общей биомассы. Динамика LAI оценивалась с использованием лаиметра AccuPAR LP-80 (Decagon Devices Inc., USA).

Аппроксимация зависимости экосистемного дыхания и валовой первичной продукции от параметров внешней среды. Для определения зависимости дыхания экосистемы от температуры воздуха и почвы использовали только оригинальные ночные данные, соответствующие критериям качества. Аппроксимация осуществлялась с применением модели Q_{10} [Pavelka et al., 2007]:

$$Q_{10} = \exp(10\alpha), \quad (1)$$

где α – параметр уравнения зависимости дыхания от температуры в логарифмическом виде

$$\ln(\text{TER}) = \alpha \cdot T + \gamma, \quad (2)$$

где T – измеренная температура; γ – эмпирический параметр уравнения.

Для определения зависимости GPP от суммарной солнечной радиации (R_g) выбраны три месяца, характеризующиеся значительными различиями условий внешней среды. При расчетах не использовались данные, полученные с применением алгоритма заполнения пропусков. Для аппроксимации зависимости использовали модель гиперболической световой кривой [Matthews et al., 2017]:

$$\text{GPP} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot R_g}{\alpha \cdot R_g + \beta},$$

где α и β – параметры аппроксимации (α – коэффициент эффективности использования суммарной солнечной радиации, $\text{мкмоль}\cdot\text{Дж}^{-1}$, β – максимальное поглощение CO_2 в точке насыщения суммарной радиации, $\text{мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Метеорологические условия наблюдений.

Для анализа взяты результаты двух лет наблюдений (2016, 2017 гг.) с 6 мая по 18 октября. В указанный период средняя температура воздуха изменялась от $-1,7$ до $23,8$ °C в 2016 г. и от $1,4$ до $20,3$ °C в 2017 г. Сумма осадков за период наблюдений в 2016 г. составила 404 мм, а в 2017 г. – 455 мм. По данным метеостанции «Заповедник» средняя температура воздуха в выбранный период 2016 г. была выше среднемноголетних значений (с 1963 по 2013 г.) на $3,5$ °C, а в период 2017 г. – на $0,6$ °C. С мая по октябрь в 2016 г. выпало меньше осадков на 3 %, в 2017 г. – на 30 % больше среднемноголетних значений.

Приход суммарной солнечной радиации в 2016 г. для анализируемого периода составил $2250 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$, а в 2017 г. – $2087 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$. Несмотря на разницу в приходящей суммарной солнечной радиации в первый и второй годы наблюдений, радиационный баланс поверхности СВ изменился лишь на десятые доли $\text{МДж}\cdot\text{м}^{-2}$ за указанный период и составил $1031 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$ как в 2016, так и в 2017 г. В 2016 г. после удаления лесного полога выявлены резкие межсуточные изменения альбедо поверхности от 11 до 24 % в зависимости от влажности верхних горизонтов почвы. Альбедо быстро уменьшалось после выпадения осадков и увеличивалось после высыхания грунта. Изменения происходили на фоне положительного тренда альбедо, вызванного возобновлением растительного покрова. Во второй половине лета, когда значения LAI приблизились к максимальным ($2,5 \text{ м}^2\cdot\text{м}^{-2}$), альбедо сплошной вырубке достигло 26 %. В 2017 г. альбедо отличалось более стабильной динамикой, а максимальные значения наблюдались не в августе, а в июне (около 30 %).

Измерения температуры и объемного влагосодержания почвы в 2016 г. начались 19 мая. В период с мая по октябрь температура почвы на глубине 10 см изменялась от $6,4$

до $20,4$ °C в 2016 г. и от $4,6$ до $16,4$ °C в 2017 г. Активное зарастание вырубке в 2017 г. привело к уменьшению средних температур почвы и амплитуд межсуточной изменчивости. Объемное влагосодержание почвы варьировало от $0,36$ до $0,43 \text{ м}^3\cdot\text{м}^{-3}$ в 2016 г. и от $0,37$ до $0,49 \text{ м}^3\cdot\text{м}^{-3}$ в 2017 г. В 2017 г. наблюдались резкие колебания объемного влагосодержания почвы, характерные для периодов интенсивного выпадения осадков. Основные метеорологические параметры за период измерений представлены в табл. 1.

Потоки CO_2 . Кумулятивный поток NEE с мая по октябрь 2016 г. составил $553,3 \text{ г}\cdot\text{С}\cdot\text{м}^{-2}$, а в 2017 г. – $193,3 \text{ г}\cdot\text{С}\cdot\text{м}^{-2}$. По результатам наблюдений получены статистически значимые различия средних суточных сумм NEE для 2016 и 2017 гг. (критерий t -Стьюдента, $t = -2,486$; $df = 332$; $p = 0,013$). Средние суточные суммы NEE составили $3,3 \pm 1,3 \text{ г}\cdot\text{С}\cdot\text{м}^{-2}$ и $1,2 \pm 2,3 \text{ г}\cdot\text{С}\cdot\text{м}^{-2}$ в 2016 и 2017 гг. соответственно. С позиции взаимодействия экосистемы с атмосферой при положительном знаке NEE экосистема является источником CO_2 для атмосферы, TER в этом случае превышает GPP, при отрицательном знаке NEE экосистема функционирует как сток CO_2 . Различия в оценках NEE между двумя годами определяются увеличением GPP и снижением TER во второй год наблюдений (рис. 1). Так, в среднем суточная сумма GPP для выбранного промежутка времени 2016 г. составила $4,7 \pm 2,9 \text{ г}\cdot\text{С}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$, а 2017 г. – $6,1 \pm 3,1 \text{ г}\cdot\text{С}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$; средняя суточная сумма TER – $7,3 \pm 2,4$ и $8,0 \pm 2,9 \text{ г}\cdot\text{С}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ в 2016 и 2017 гг. соответственно.

Наиболее заметные различия NEE отмечались с мая по июль. Если в 2016 г. величины NEE изменялись в диапазоне от $2,1$ до $6,1 \text{ г}\cdot\text{С}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$, то в 2017 г. вырубке была преимущественно стоком CO_2 , в этот период времени NEE изменялся от $-4,3$ до $2,8 \text{ г}\cdot\text{С}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$. Если сезонный ход TER периода измерений 2017 г. почти не отличался от соответствующего периода 2016 г., демонстрируя постепенное увеличение суточных сумм до конца июля, то динамика GPP различалась между двумя годами. В 2016 г. из-за медленного восстановления растительного покрова максимальные значения GPP были достигнуты в конце июля ($10,8 \text{ г}\cdot\text{С}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$), а в 2017 г. наблюдались с 15 июня до 13 июля.

Метеорологические условия периода измерений (май – октябрь) по данным эколого-климатической станции на сплошной вырубке в 2016 и 2017 гг.

Месяц	$T_{a, \text{мин}}$, °С	$T_{a, \text{макс}}$, °С	$T_{a, \text{ср}}$, °С	Осадки, мм	R_g , МДж·м ⁻²	T_s , °С	SWC, м ³ ·м ⁻³
2016 г.							
V	3,9	24,3	14,8	61,8	514,3	13,4	0,43
VI	5,3	29,9	16,9	67,3	639,6	16,0	0,41
VII	9,5	29,2	18,7	106,2	568,3	18,3	0,41
VIII	8,5	28,4	17,1	48,8	493,0	17,2	0,41
IX	4,5	22,0	10,9	47,6	260,7	12,9	0,38
X	-2,4	15,7	4,9	17,0	74,0	8,6	0,42
2017 г.							
V	-3,0	25,1	9,2	32,7	453	9,1	0,42
VI	0,0	24,1	12,2	111,4	493	12,5	0,42
VII	5,0	25,9	15,2	96,7	461	14,3	0,41
VIII	2,0	28,1	15,5	69,8	406	14,9	0,40
IX	-0,7	25,6	10,8	71,3	223	11,7	0,42
X	1,6	12,1	6,4	73,4	51	8,5	0,46

П р и м е ч а н и е. $T_{a, \text{мин}}$ – минимальная температура воздуха за месяц; $T_{a, \text{макс}}$ – максимальная температура воздуха за месяц; $T_{a, \text{ср}}$ – средняя месячная температура воздуха; R_g – месячные суммы суммарной радиации; T_s – средняя месячная температура почвы на глубине 10 см; SWC – среднее за месяц объемное влагосодержание верхнего 10-сантиметрового слоя почвы.

Во второй год измерений наблюдалось снижение межсуточной изменчивости TER ($C_v = 40\%$ в 2016 г. и 33% в 2017 г.), а также GPP (61% в 2016 г. и 51% в 2017 г.). В то же время межсуточные вариации отношения GPP/TER увеличились ($C_v = 37$ и 40% в 2016 и 2017 гг. соответственно). При этом межсуточная изменчивость суммарной радиации ($C_v = 51\%$ в 2016 г. и 58% в 2017 г.) и температуры воздуха ($C_v = 38$ и 48% в 2016 и 2017 гг. соответственно) также увеличилась. Если в 2016 г. отношение GPP/TER изменялось в диапазоне от 0,1 в мае до 0,8 в августе, то в 2017 г. оно было минимальным (0,3) в октябре и максимальным (1,6) в мае. Основные различия в динамике отношения GPP/TER приходились на конец весны и первую половину лета. Начиная с августа и в осенние месяцы статистически значимых различий суточных сумм отношения GPP/TER между 2016 и 2017 гг. обнаружено не было (критерий t -Стьюдента, $t = 0,368$; $df = 156$; $p = 0,713$).

Амплитуда суточной динамики потоков CO₂ была наибольшей в конце весны. В мае 2016 г. поглощение CO₂ в результате фотосинтеза (максимальные величины GPP в среднем составили $3,2 \pm 1,2$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹) не превышало TER в полуденные часы (вырубка функционировала как источник CO₂), а NEE в этот

же период времени составляло $2,5 \pm 1,4$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹, в то время как в 2017 г. GPP достигало $19,1 \pm 5,0$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹ и вырубка в мае была устойчивым стоком CO₂ в светлое время суток (NEE = $-5,9 \pm 3,5$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹). В 2016 г. поглощение CO₂ стало преобладать над эмиссией в светлое время суток начиная с июля (максимальные за сутки величины NEE в среднем достигали $-2,3 \pm 4,1$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹). TER в среднем составляло около $9,0 \pm 3,8$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹ в 2016 г. и $7,8 \pm 1,1$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹ в 2017 г. В 2017 г. также отмечалось снижение суточной амплитуды TER. Кумулятивные суммы компонентов баланса CO₂ представлены в табл. 2. Данные камерных измерений показали, что в полуденные часы летних месяцев дыхание почвы на различных участках сплошной вырубки изменялось от $3,6 \pm 0,7$ до $11,8 \pm 3,0$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹ в 2016 г. и от $6,0 \pm 1,3$ до $14,8 \pm 3,5$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹ в 2017 г.

Зависимости потоков CO₂ от факторов внешней среды. Ночные значения температуры почвы в 2016 г. (рис. 2) варьировали в более широком диапазоне (от 11,3 до 20,5 °С) по сравнению с 2017 г. (от 4,7 до 16,5 °С). Диапазон изменения температур воздуха в ночные часы был также больше в 2016 г. (от -0,9 до 26,3 °С), чем в 2017 г. (от -0,7 до 17,4 °С). При этом величина ночного потока TER на-

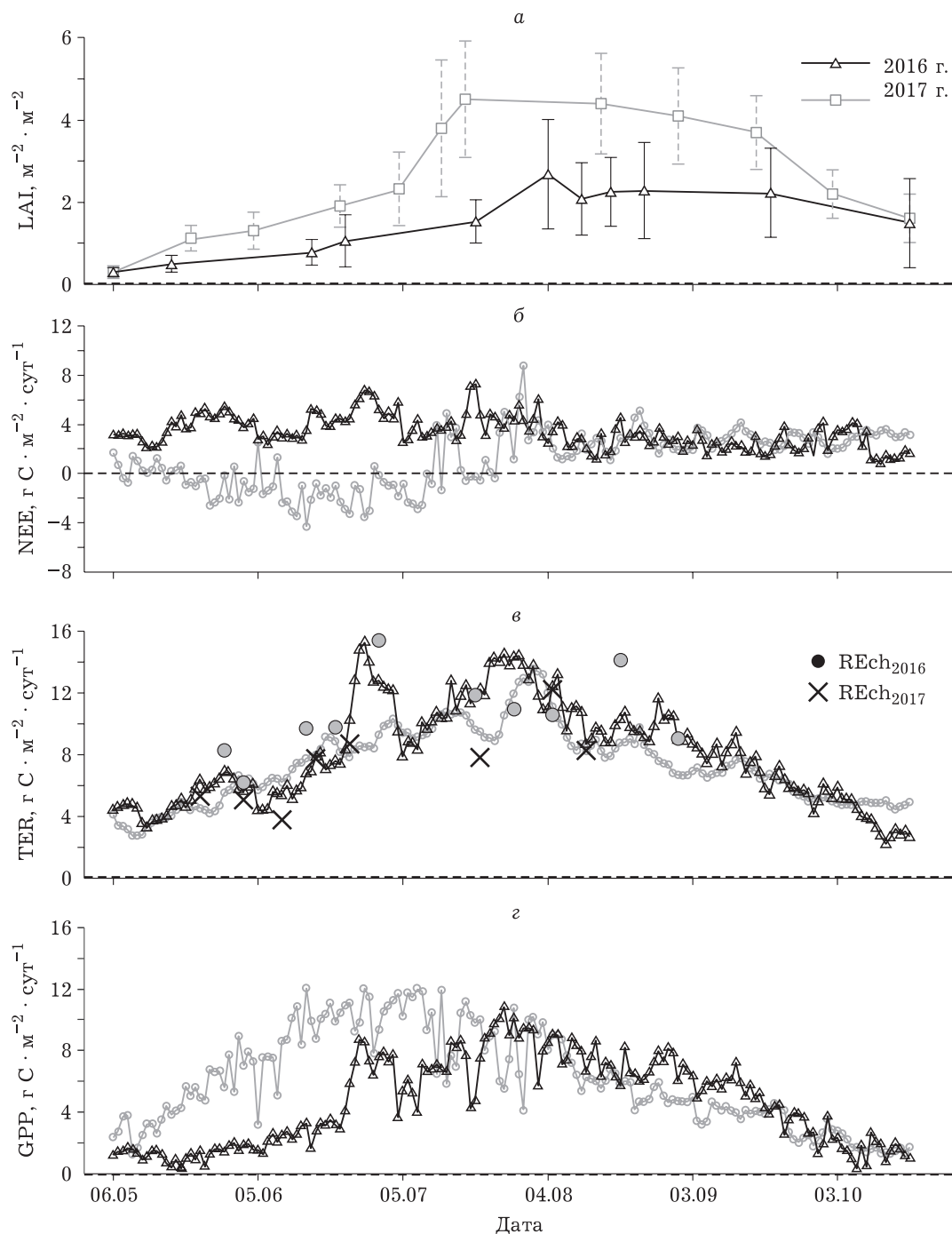


Рис. 1. Средние для вырубki величины LAI со стандартными отклонениями (а), суточные суммы чистого экосистемного обмена (NEE) (б), экосистемного дыхания (TER) и почвенного дыхания по данным камерных измерений (REch) (в) и валовой первичной продукции (GPP) за период с 6 мая по 18 октября 2016 и 2017 гг. (г)

ходила в пределах от 1 до 16 $\text{мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ в 2016 г. и от 2 до 13 $\text{мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ в 2017 г.

Для 2017 г. наилучшая аппроксимация температурной зависимости TER была получена при использовании температуры почвы. Ве-

личина Q_{10} снизилась в 2017 г. по сравнению с 2016 г., причем дыхание экосистемы оказалось более чувствительным к температуре воздуха. Параметры аппроксимаций и значения Q_{10} представлены в табл. 3.

Определяющим фактором динамики GPP является поступление солнечной радиации. В мае 2016 г. растительность только начала активное возобновление, тогда как в мае 2017 г. наблюдался более плотный травяной покров. Как следствие, при одинаковом диапазоне изменения R_g диапазон изменения GPP был уже весной 2016 г. (рис. 3). В результате этого в мае 2016 г. отмечались достаточно низкие коэффициенты эффективности использования суммарной радиации ($\alpha = 0,02$ мкмоль·Дж⁻¹), а точка насыщения (β) согласно уравнения (3) составила 4,8 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ (табл. 4). В мае 2017 г., напротив, наблюдались относительно высокие величины GPP, коэффициент α составил 0,1 мкмоль·Дж⁻¹, а $\beta = 10,4$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹. В августе 2016 и 2017 гг. растительный покров вырубки характеризовался максимальными значениями листового индекса (более 2 и 4 м²·м⁻² соответственно) (см. рис. 1, а). В этот период коэффициенты α были уже намного выше, а β достигли годовых максимумов (см. табл. 4), при этом в ав-

Т а б л и ц а 2
Кумулятивные суммы потоков CO₂ за период с 06.05 по 18.10 2016 и 2017 гг. соответственно

Параметр, г С·м ⁻²	2016 г.	2017 г.
NEE	553,3	193,3
TER	1330,9	1213,7
GPP	777,5	1020,5
GPP/TER	0,58	0,84

густе 2016 г. коэффициенты были выше, чем за тот же период 2017 г. В октябре 2017 г. диапазон изменения R_g был меньше, чем в октябре 2016 г., однако это не повлияло на формы световых кривых. Как и в августе, коэффициенты α и β в 2016 г. были выше, причем коэффициент эффективности использования суммарной радиации в октябре 2016 г. был максимальным ($\alpha = 0,2$ мкмоль·Дж⁻¹).

На рис. 4 представлен график зависимости суточных сумм GPP и средних по сплошной вырубке величин LAI. Наибольшие значения GPP наблюдались во время периодов

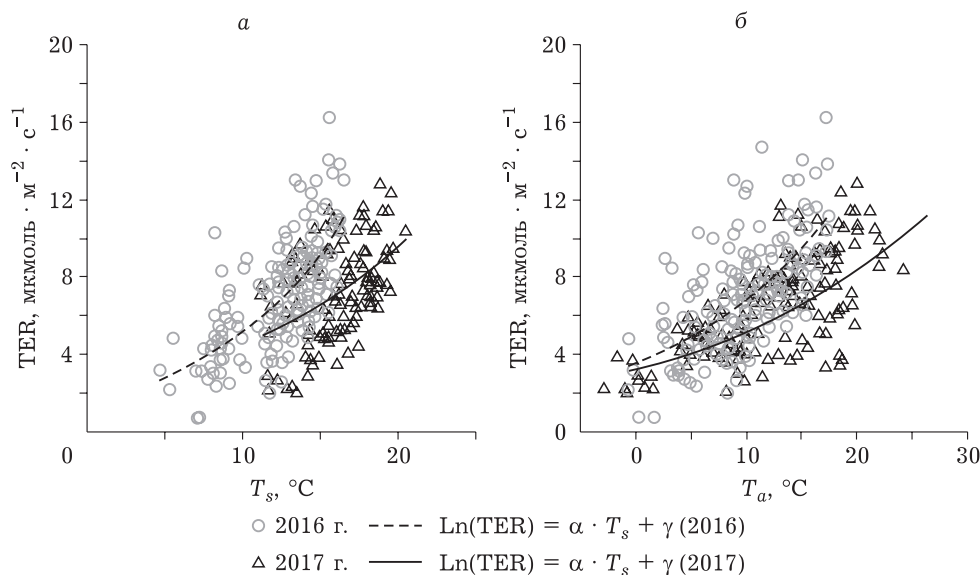


Рис. 2. Зависимость средних ночных величин полного дыхания экосистемы от температуры почвы на глубине 10 см (а) и температуры воздуха на высоте 2 м (б)

Т а б л и ц а 3
Параметры и коэффициент детерминации (см. ур-ние (2)) при использовании температуры почвы на глубине 10 см (T_s) и температуры воздуха (T_a)

Параметр	2016 г.				2017 г.			
	α	γ	R^2	Q_{10}	α	γ	R^2	Q_{10}
T_s	0,075	0,764	0,237	2,12	0,047	1,179	0,461	1,60
T_a	0,120	0,433	0,500	3,32	0,065	1,284	0,413	1,92

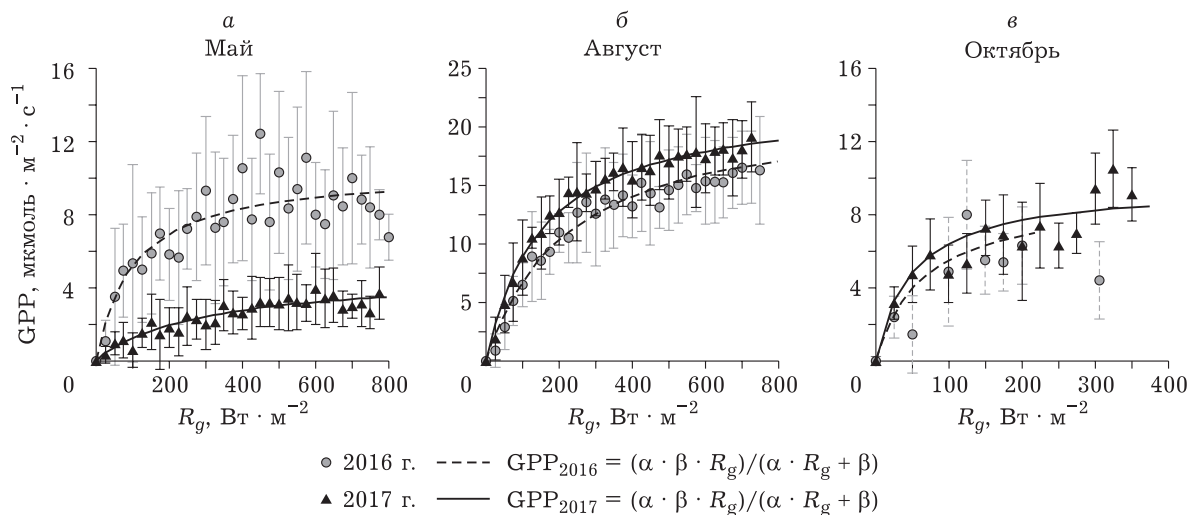


Рис. 3. Зависимость валовой первичной продукции (GPP) от количества приходящей суммарной солнечной радиации (R_g) для 2016 и 2017 гг. Величины GPP представлены как средние значения для классов R_g (\pm стандартное отклонение), соответствующие интервалам через каждые 25 Вт·м⁻²

Т а б л и ц а 4
П а р а м е т р ы (с м. ур-ние (3)) и коэффициент детерминации

Месяц	2016 г.			2017 г.		
	α , мкмоль·Дж ⁻¹	β , мкмоль·м ⁻² ·с ⁻¹	R^2	α , мкмоль·Дж ⁻¹	β , мкмоль·м ⁻² ·с ⁻¹	R^2
Май	0,02	4,8	0,940	0,10	10,4	0,873
Август	0,15	22,4	0,994	0,10	21,8	0,978
Октябрь	0,2	9,6	0,665	0,14	9,0	0,725

роста LAI. В диапазоне изменения LAI до 2,5 м²·м⁻² суточные суммы GPP изменялись от 0,4 до 8,5 г С·м⁻²·сут⁻¹ в 2016 г. и от 1,8 до 11,7 г С·м⁻²·сут⁻¹ в 2017 г. Несмотря на то что наиболее низкая эффективность использова-

ния суммарной радиации наблюдалась весной, в мае 2017 г. отмечались высокие величины суточных сумм GPP, а в августе и осенью при высоких значениях α – относительно меньшие значения GPP.

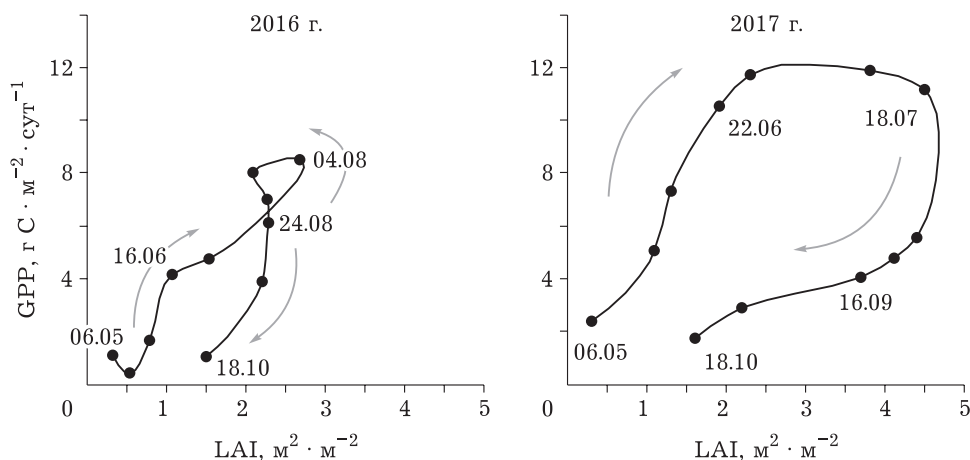


Рис. 4. Зависимость суточных сумм валовой первичной продукции (GPP) и средних по вырубке величин листового индекса растительного покрова (LAI) для 2016 и 2017 гг. Стрелками показана последовательность измерений

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ потоков CO_2 между экосистемой СВ и атмосферой в подзоне южной тайги показал, что полученные в рамках настоящего исследования оценки оказались сопоставимы с результатами других экспериментальных исследований, проведенных ранее на сплошных вырубках первых лет зарастания в различных природных и климатических условиях [Amiro et al., 2006; Amiro et al., 2010; Aguilos et al., 2014; Williams et al., 2014; Paul-Limoges et al., 2015]. А именно, лесная экосистема в первые годы после проведения сплошной рубки является источником CO_2 для атмосферы за счет изменения структуры баланса CO_2 (низких, по отношению к зрелым древостоям, величин GPP). Важно отметить, что по результатам экспериментальных наблюдений в широколиственных и бореальных лесах получен существенный разброс в оценках экосистемных потоков CO_2 и отношения GPP/TER. По данным, полученным на основе метода турбулентных пульсаций в лесных экосистемах умеренных широт в Северной Америке, Западной Европе и Японии в первый и второй годы после проведения сплошной рубки, NEE изменяется в диапазоне от 0,8 до 4,1 г $\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ [Kowalski et al., 2003; Aguilos et al., 2014; Paul-Limoges et al., 2015; Mamkin et al., 2019], причем баланс CO_2 определяется превышением TER над GPP, максимальные положительные значения NEE, как правило, достигаются в первый год после проведения сплошной рубки. Уже во второй год из-за роста GPP величина NEE обычно начинает снижаться, т. е. баланс CO_2 между СВ и атмосферой смещается в сторону депонирования атмосферного CO_2 . Согласно результатам нашего эксперимента NEE во второй год снизилось на 64 %. По разным данным [Aguilos et al., 2014; Williams et al., 2014; Paul-Limoges et al., 2015] во второй год после удаления лесного полога NEE снижается от 12 до 40 % на вырубках разных типов хвойных и широколиственных лесов. Однако измерения NEE на сплошной вырубке лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii*) в Якутии, проведенные в работе [Machimura et al., 2005], наоборот, зафиксировали усиление роли экосистемы в качестве источника CO_2 (NEE увеличилось во второй год на 54 %). Как показано в работе [Amiro et al., 2010], на основе обобщения данных наблюдений

за потоками CO_2 методом турбулентных пульсаций в нарушенных экосистемах США и Канады увеличение доли поглощения атмосферного CO_2 и снижение доли эмиссии в балансе CO_2 в последующие годы, вплоть до восстановления экосистемы в качестве стока CO_2 для атмосферы, протекает неравномерно и значительно варьирует в зависимости от погодных, климатических, географических условий и состава растительного сообщества. В среднем, согласно В. D. Amiro et al. [2010], экосистеме требуется около 10–20 лет для того, чтобы восстановить функцию стока атмосферного CO_2 , однако в отдельных случаях рубка может оказывать гораздо более продолжительное влияние на баланс CO_2 лесной экосистемы. Так, Hirata et al. [2014] получено, что нарушения, вызванные рубкой леса, оказывали влияние на потоки CO_2 в лиственничных лесах на о-ве Хоккайдо (Япония) даже спустя 52 года после проведения сплошных рубок.

Величина NEE в каждый отдельный год зависит от соотношения между основными компонентами баланса CO_2 , такими как TER и GPP. Стоит заметить, что в данном исследовании были получены относительно высокие значения как TER (7,3 г $\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ в 2016 г. и 8,0 г $\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ в 2017 г.), так и GPP (4,7 г $\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ в 2016 г. и 6,1 г $\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ в 2017 г.) по сравнению с оценками других исследований. Наиболее близкие по величине значения (TER = 6,9, GPP = 4,0 г $\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$) зарегистрированы [Williams et al., 2014] на сплошной вырубке второго года в еловом лесу (*Picea abies* и *Picea glauca*) в штате Массачусетс (США). По результатам измерений с мая по октябрь на вырубке в хвойном лесу с доминированием пихты Дугласа (*Pseudotsuga menziesii*) в штате Саскачеван (Канада) F. Paul-Limoges et al. [2015] определили, что в первый год величина TER составила около 4,5 г $\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$, а GPP около 0,4 г $\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$, к третьему году TER достигло 5,5 г $\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$, а GPP выросла всего до 2,5 г $\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$. По данным измерений с июля по октябрь на вырубке пятого года сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в Финляндии, опубликованным [Kolari et al., 2004], TER составило 3,2 г $\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$, а GPP – 1,8 г $\text{C}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$.

При том, что полученные в настоящем исследовании абсолютные величины GPP и TER

оказались относительно высокими, отношение GPP/TER находится в рамках диапазона изменчивости данного показателя для других нарушенных экосистем (0,64 в 2016 г. и 0,76 в 2017 г.). Так, например, по данным B. D. Amiro et al. [2010], значения отношения GPP/TER в экосистемах вырубок ранних лет в США и Канаде обычно изменяются от 0,2 до 1,2. Для сравнения, отношение GPP/TER в темновойных лесах Центральной Европы, согласно [Falge et al., 2002], изменяется от 1,2 до 2,0 [Ольчев и др., 2017].

Стоит отметить, что значения Q_{10} для ночного дыхания (1,60–2,12 при использовании температуры почвы и 1,92–3,32 при использовании температуры воздуха) оказались сопоставимыми с оценками других исследований. Например, по данным Giasson et al. [2006], значение Q_{10} на сплошной вырубке ели черной (*Picea mariana*) второго года в штате Квебек (Канада) составило в среднем 2,2. O. Bergeron et al. [2008] получил величину $Q_{10} = 2,8$ на вырубке ели черной четвертого года, причем различий в значениях Q_{10} между зрелым древостоем и сплошной вырубкой обнаружено не было.

Одной из основных особенностей динамики валовой первичной продукции на сплошной вырубке по результатам данного исследования является тенденция к увеличению коэффициента эффективности использования суммарной солнечной радиации от весны к осени. Такая же тенденция была отмечена в исследовании Paul-Limoges et al. [2015]. Однако если коэффициент насыщения в нашем эксперименте по-разному изменялся от года к году в зависимости от месяца, то в работе [Paul-Limoges et al., 2015] указано, что коэффициент β увеличивался в течение всех сезонов первых двух лет зарастания вырубки. Значительный рост данных показателей от года к году также был отмечен Humphreys et al. [2006] на молодой вырубке пихты Дугласа на о-ве Ванкувер (Канада) и на зарастающем ветровале бука европейского (*Fagus sylvatica*), ели европейской и пихты белой (*Abies alba*) в Верхней Австрии [Matthews et al., 2017], а также на свежей вырубке в ельнике (*Picea abies* и *Picea glauca*) в штате Массачусетс (США) [Williams et al., 2014]. По всей видимости, наблюдаемые изменения параметров световых кривых связаны с двумя основными

факторами: динамикой LAI и изменением погодных условий. Низкие величины параметров световых кривых в весенние месяцы могут объясняться небольшим количеством фотосинтезирующей биомассы при большом поступлении суммарной радиации [Williams et al., 2014]. В то же время относительно высокие величины эффективности использования суммарной радиации осенью могут объясняться как преимущественно облачными погодными условиями, при которых увеличена доля рассеянной радиации (что способствует лучшему проникновению света в глубь растительного покрова), так и меньшими температурами воздуха и меньшими величинами дефицита насыщения водяного пара [Urban et al., 2012]. Повышенная температура и дефицит влажности оказывают ингибирующее влияние на фотосинтез в жаркие летние дни.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование основных составляющих баланса CO_2 между экосистемой сплошной вырубки и атмосферой в подзоне южной тайги европейской части России показало, что сплошная вырубка в течение двух лет после полного удаления древостоя остается источником диоксида углерода для атмосферы. Основное влияние на величину NEE оказывает динамика валовой первичной продукции. Восстановление растительного покрова на сплошной вырубке второго года зарастания приводит к трансформации экосистемы сплошной вырубки из источника в сток CO_2 для атмосферы в мае и июне. Валовая первичная продукция преобладает над экосистемным дыханием в светлое время суток уже к середине первого вегетационного периода (июль) после сплошной рубки леса.

Обнаружено снижение величин Q_{10} во второй год зарастания вырубки. Коэффициент эффективности использования суммарной солнечной радиации при фотосинтезе минимален весной и максимален осенью. Полученные в нашем исследовании результаты измерения NEE и отношения GPP/TER соответствуют полученным ранее данным аналогичных исследований в различных нарушенных лесных экосистемах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и РГО в рамках научного проек-

та № 17-05-41127 РГО_а, при поддержке программ Президиума РАН № 41 «Биоразнообразие природных систем и биологические ресурсы России» и № 51 «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования». Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику ИПЭЭ РАН К. А. Ермохиной за геоботанические описания, выполненные на вырубке.

ЛИТЕРАТУРА

- Алисов Б. П. Климат СССР. М.: Высш. шк., 1956. 104 с.
- Иванова Н. С., Быстрой Г. П. Модель формирования структуры древесного яруса на вырубках. Ч. 1. Управляющие параметры // Аграр. вестн. Урала. 2010. Т. 71, № 5. С. 85–89.
- Кузнецов М. А. Эмиссия CO₂ с поверхности почвы вырубок ельников с учетом условий технической нагрузки (пасека, волок) // Материалы докл. XXIV Всерос. молодеж. науч. конф. (с элементами науч. шк.), посвящ. 55-летию Ин-та биологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», 2017. С. 98–100.
- Молчанов А. Г., Курбатова Ю. А., Ольчев А. В. Влияние сплошной вырубки леса на эмиссию CO₂ с поверхности почвы // Изв. РАН. Сер. биол. 2017. № 2. С. 190–196.
- Ольчев А. В., Мамкин В. В., Авиллов В. К., Байбар А. С., Иванов Д. Г., Курбатова Ю. А. Сезонная динамика потоков диоксида углерода, явного и скрытого тепла на свежей сплошной вырубке в южно-таежной зоне европейской части России // Пробл. экол. мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28, № 4. С. 5–23.
- Пузаченко Ю. Г., Желтухин А. С., Козлов Д. Н., Кораблев Н. П., Федяева М. В., Пузаченко М. Ю., Сиунова Е. В. Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник: популярный очерк. М.: Изд-во «Деловой мир», 2007. 80 с.
- Рыбальченко Н. Г., Цареградский П. В. Сплошные рубки и лесовосстановительный процесс на вырубках // Лес. вестн. Forestry Bull. 2011. № 3. С. 4–6.
- Уланова Н. Г., Жуковская О. В., Кукушина Н. В., Демидова А. Н. Структура и динамика популяций березы бородавчатой (*Betula Pendula* Roth) в наземно-вейниковых фитоценозах сплошных вырубок ельников в Костромской области // Бюл. МОИП. Отд. биол. 2005. Т. 110, № 5. С. 27–35.
- Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
- Aguilos M., Takagi K., Liang N., Ueyama M., Fukuzawa K., Nomura M., Kishida O., Fukazawa T., Takahashi H., Kotsuka C., Sakai R., Ito K., Watanabe Y., Fujinuma Y., Takahashi Y., Muragama T., Saigusa N., Sakai R. Dynamics of ecosystem carbon balance recovering from a clear-cutting in a cool-temperate forest // Agric. For. Meteorol. Elsevier. 2014. Vol. 197. P. 26–39.
- Amiro B. D., Barr A. G., Barr J. G., Black T. A., Bracho R., Brown M., Chen J., Clark K. L., Davis K. J., Desai A. R., Dore S., Engel V., Fuentes J. D., Goldstein A. H., Goulden M. L., Kolb T. E., Lavigne M. B., Law B. E., Margolis H. A., Martin T., McCaughey J. H., Misson L., Montes-Helu M., Noormets A., Randerston J. T., Starr G., Xiao J. Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America // J. Geophys. Res. Biogeosci. Wiley Online Library. 2010. Vol. 115, N G4.
- Amiro B. D., Barr A. G., Black T. A., Iwashita H., Kljun N., McCaughey J. H., Morgenstern K., Murayama S., Nesci Z., Orchansky A. L., Saigusa N. Carbon, energy and water fluxes at mature and disturbed forest sites, Saskatchewan, Canada // Agric. For. Meteorol. Elsevier, 2006. Vol. 136, N 3–4. P. 237–251.
- Aubinet M., Vesala T., Papale D. Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis. Springer Sci. & Business Media, 2012. 438 p.
- Bergeron O., Margolis H. A., Coursolle C., Giasson M. A. How does forest harvest influence carbon dioxide fluxes of black spruce ecosystems in eastern North America? // Agric. For. Meteorol. Elsevier. 2008. Vol. 148, N 4. P. 537–548.
- Burba G., Kurbatova J., Kuricheva O., Avilov V., Mamkin V. Handbook for the Method of Turbulent Pulsations [Метод турбулентных пульсаций: Краткое практ. рук.]. LI-COR Biosciences, IPEE, Russian National Academy of Sciences, 2016. 223 p.
- Coursolle C., Margolis H. A., Giasson M. A., Bernier P. Y., Amiro B. D., Arain M. A., Barr A. G., Black T. A., Goulden M. L., McCaughey J. H., Chen J. M., Dunn A. L., Grant R. F., Lafleur P. M. Influence of stand age on the magnitude and seasonality of carbon fluxes in Canadian forests // Agric. For. Meteorol. Elsevier. 2012. Vol. 165. P. 136–148.
- Desherevskaya O., Kurbatova J., Olchev A. Climatic conditions of the south part of Valday Hills, Russia, and their projected changes during the 21st century // Open Geogr. J. 2010. Vol. 3. P. 73–79.
- Falge E., Baldocchi D., Tenhunen J., Aubinet M., Bakwin P., Berbigier P., Bernhofer C., Burba G., Clement R., Davis K. J., Elbers J. A., Goldstein A. H., Grelle A., Granier A., Guðmundsson J., Hollinger D., Kowalski A. S., Katul G., Law B. E., Malhi Y., Meyers T., Monson R. K., Munger J. T., Oechel W., Paw K. T. U., Pilegaard K., Rannik Ü, Rebmann C., Suyker A., Valentini R., Wilson K., Wofsy S. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements // Agric. For. Meteorol. Elsevier. 2002. Vol. 113, N 1. P. 53–74.
- FAO State of the World's Forests 2011. Rome, 2011. 179 p.
- Foken T., Göckede M., Mauder M., Mahrt L., Amiro B. D., Munger J. W. Post-field data quality control // Handbook of micrometeorology. Springer, 2004. P. 181–208.
- Giasson M.-A., Coursolle C., Margolis H. A. Ecosystem-level CO₂ fluxes from a boreal cutover in eastern Canada before and after scarification // Agric. For. Meteorol. Elsevier. 2006. Vol. 140, N 1–4. P. 23–40.
- Grant R. F., Barr A. G., Black T. A., Margolis H. A., McCaughey J. H., Trofymow J. A. Net ecosystem productivity of temperate and boreal forests after clearcutting – a Fluxnet-Canada measurement and modelling synthesis // Tellus B. Chem. Phys. Meteorol. Taylor & Francis. 2010. Vol. 62, N 5. P. 475–496.
- Hirata R., Takagi K., Ito A., Hirano T., Saigusa N. The impact of climate variation and disturbances on the carbon balance of forests in Hokkaido, Japan // Biogeosci. Copernicus GmbH. 2014. Vol. 11, N 18. P. 5139–5154.
- Humphreys E. R., Black T. A., Morgenstern K., Cai T.,

- Drewitt G. B., Nestic Z., Trofymow J. A. Carbon dioxide fluxes in coastal Douglas-fir stands at different stages of development after clearcut harvesting // *Agric. For. Meteorol.* Elsevier. 2006. Vol. 140, N 1-4. P. 6-22.
- Ivanov D. G., Avilov V. K., Kurbatova Y. A. CO₂ fluxes at south taiga bog in the European part of Russia in summer // *Contemp. Probl. Ecol.* Springer. 2017. Vol. 10, N 2. P. 97-104.
- Keenan R. J., Kimmins J. P. The ecological effects of clear-cutting // *Environ. Rev.* NRC Research Press, 1993. Vol. 1, N 2. P. 121-144.
- Kolari P., Pumpanen J., Rannik Ü., Ilvesniemi H., Hari P., Berninger F. Carbon balance of different aged Scots pine forests in Southern Finland // *Glob. Chang. Biol.* Wiley Online Library. 2004. Vol. 10, N 7. P. 1106-1119.
- Kowalski S., Sartore M., Burlett R., Berbigier P., Loustau D. The annual carbon budget of a French pine forest (*Pinus pinaster*) following harvest // *Glob. Chang. Biol.* Wiley Online Library. 2003. Vol. 9, N 7. P. 1051-1065.
- Lasslop G., Reichstein M., Papale D., Richardson A. D., Arneth A., Barr A., Stoy P., Wohlfahrt G. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation // *Glob. Chang. Biol.* Wiley Online Library, 2010. Vol. 16, N 1. P. 187-208.
- Lloyd J., Taylor J. A. On the temperature dependence of soil respiration // *Funct. Ecol.* 1994. P. 315-323.
- Machimura T., Kobayashi Y., Hirano T., Lopez L., Fukuda M., Fedorov A. N. Change of carbon dioxide budget during three years after deforestation in eastern Siberian larch forest // *J. Agric. Meteorol.* The Society of Agric. Meteorol. of Japan. 2005. Vol. 60, N 5. P. 653-656.
- Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Varlagin A., Yaseneva I., Olchev A. Energy and CO₂ exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the southern taiga // *Agric. For. Meteorol.* 2019. Vol. 265. P. 252-268.
- Matthews B., Mayer M., Katzensteiner K., Godbold D. L., Schume H. et al. Turbulent energy and carbon dioxide exchange along an early-successional windthrow chronosequence in the European Alps // *Agric. For. Meteorol.* Elsevier. 2017. Vol. 232. P. 576-594.
- Migliavacca M., Meroni M., Manca G., Matteucci G., Montagnani L., Grassi G., Zenone T., Teobaldelli M., Goded I., Colombo R., Seufert G. Seasonal and interannual patterns of carbon and water fluxes of a poplar plantation under peculiar eco-climatic conditions // *Agric. For. Meteorol.* Elsevier. 2009. Vol. 149, N 9. P. 1460-1476.
- Papale D., Reichstein M., Aubinet M., Canfora E., Bernhofer C., Kutsch W., Longdoz B., Rambal S., Valentini R., Vesala T., Yakir D. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation // *Biogeosciences.* 2006. Vol. 3, N 4. P. 571-583.
- Paul-Limoges E., Black T. A., Christen A., Nestic Z., Jassal R. S. Effect of clearcut harvesting on the carbon balance of a Douglas-fir forest // *Agric. For. Meteorol.* Elsevier. 2015. Vol. 203. P. 30-42.
- Pavelka M., Acosta M., Marek M. V., Kutsch W., Janous D. Dependence of the Q₁₀ values on the depth of the soil temperature measuring point // *Plant Soil.* Springer. 2007. Vol. 292, N 1-2. P. 171-179.
- Pongratz J., Reick C. H., Raddatz T., Claussen M. Effects of anthropogenic land cover change on the carbon cycle of the last millennium // *Global Biogeochem. Cycles.* Wiley Online Library. 2009. Vol. 23, N 4.
- Reichstein M. M., Falge E., Baldocchi D., Papale D., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Gilmanov T., Granier A., Grünwald T., Harránková K., Ilvesniemi H., Janous D., Knohl A., Laurila T., Lohila A., Loustau D., Matteucci G., Meyers T., Miglietta F., Ourcival J.-M., Pumpanen J., Rambal S., Rotenberg E., Sanz M., Tenhunen J., Seufert G., Vaccari F., Vesala T., Yakir D., Valentini R. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm // *Glob. Chang. Biol.* Wiley Online Library. 2005. Vol. 11, N 9. P. 1424-1439.
- Rodrigues A., Pita G. Recovery of GPP monthly pattern in a eucalypt site in Portugal after felling // *Biogeosci. Discuss.* Copernicus GmbH. 2011. N 2. P. 3999-4014.
- Schulze E. D., Wirth C., Heimann M. Managing forests after Kyoto // *Science.* 2000. Vol. 289, N 5487. P. 2058-2059.
- Urban O., Klem K., Ač A., Havránková K., Holišova P., Navrátil M., Zitová M., Kozlová K., Pokorný R., Šprtova M., Tomaškova I., Šprunda V., Grace J. Impact of clear and cloudy sky conditions on the vertical distribution of photosynthetic CO₂ uptake within a spruce canopy // *Funct. Ecol.* 2012. Vol. 26, N 1, P. 46-55.
- Williams C. A., Vanderhoof M. K., Khomik M., Ghimire B. Post-clearcut dynamics of carbon, water and energy exchanges in a midlatitude temperate, deciduous broadleaf forest environment // *Glob. Chang. Biol.* Wiley Online Library. 2014. Vol. 20, N 3. P. 992-1007.
- Wutzler T., Lucas-Moffat A., Migliavacca M., Knauer J., Sickel K., Šigut L., Menzer O., Reichstein M. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REdDyProc // *Biogeosciences.* 2018. N 15. P. 5015-5030.
- Zamolodchikov D. G., Grabovskii V. I., Shulyak P. P., Chesnykh O. V., Recent decrease in carbon sink to Russian forests // *Dokl. Biol. Sci.* 2017. Vol. 476, N 1. P. 200-202.

CO₂ fluxes at the dear-cut in the southern taiga of European Russia

V. V. MAMKIN¹, V. K. AVILOV¹, D. G. IVANOV¹, A. V. OLCHEV^{1,2}, J. A. KURBATOVA¹

¹*A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of RAS
119071, Moscow, Leninsky av., 33
E-mail: vadimmamkin@gmail.com*

²*Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University
119991, Moscow, Leninskie gory, GSP-1*

Forest disturbances induced by the clear-cutting (CC) leads to the transformation of the natural biogeochemical processes, which determining main greenhouse gas fluxes (principally CO₂) between forest ecosystems and the atmosphere. Effects of clear-cutting on CO₂ exchange substantially vary depending on local environmental and climate conditions. This study is focused on estimation of net ecosystem exchange of CO₂ (NEE), gross primary production (GPP), total ecosystem respiration (TER) and soil respiration in southern taiga in European Russia. The results are based on continuous eddy covariance measurements during the 2 growing seasons (2016 and 2017). The research showed that the clear-cut was a consistent source of CO₂ for the atmosphere during the first years following harvest (NEE since May to October is 553.3 2016 and 193.3 g C·m⁻² in 2017). Interannual variability of the cumulative NEE, of GPP (777.5 g C·m⁻² in 2016 and 1020.5 g C·m⁻²) and decrease in TER (1330.95 g C·m⁻² in 2016 and 1213.7 g C·m⁻² in 2017).

The results of chamber measurements showed, that soil respiration in the midday hours in summer changed between 3.6 ± 0.7 and 11.8 ± 3.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ in 2016 and between 6.0 ± 1.3 and 14.8 ± 3.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ in 2017 at the different plots within the clear-cut site. The estimates of the cumulative GPP at the clear-cut in southern taiga of European Russia exceed the GPP rates obtained previously in the other clear-cut forest ecosystems, located in boreal and sub-boreal ecozones.

Key words: Clear-cut, CO₂ fluxes, carbon cycle, southern taiga, NEE, TER, GPP.