

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ПОТОКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА, ЯВНОГО И СКРЫТОГО ТЕПЛА НА СВЕЖЕЙ СПЛОШНОЙ ВЫРУБКЕ В ЮЖНО-ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

А.В. Ольчев^{1),2)}, В.В. Мамкин²⁾, В.К. Авилов²⁾, А.С. Байбар¹⁾,
Д.Г. Иванов²⁾, Ю.А. Курбатова²⁾*

¹⁾ Географический факультет МГУ,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, ГСП-1; * aoltche@gmail.com

²⁾ Институт Проблем Экологии и Эволюции им. А.Н. Северцова, Российская Академия Наук,
Россия, 109071, Москва, Ленинский просп., 33

Резюме. Проведено комплексное исследование по оценке влияния сплошной свежей вырубki на потоки явного (H) и скрытого (LE) тепла, а также на составляющие нетто CO_2 обмена (NEE) между земной поверхностью и атмосферой в смешанном лесу, расположенном в подзоне южной тайги на Европейской территории России (ЕТР). В ходе измерений, проведенных с применением метода турбулентных пульсаций (eddy covariance) и экспозиционных камер в период с апреля по октябрь 2016 года, выявлена высокая сезонная и внутрисуточная изменчивость потоков H и LE , а также NEE , определяемая как метеорологическими условиями, так динамикой листового индекса (LAI) активно восстанавливающейся на вырубке растительности. Было показано, что в течение первого года после проведения лесохозяйственных мероприятий суточные величины экосистемного дыхания (RE) на сплошной вырубке превышали дневные значения валовой первичной продукции (GPP) травянистой растительности и древесного подростa. Величина NEE , осредненная за весь период измерений, составила 3.3 ± 1.3 гС·м⁻² в день. Величина LE достигла максимальных значений в конце июля (8.9 МДж·м⁻² в день). Минимальные значения LE (менее 1.0 МДж·м⁻² в день) наблюдались в апреле и в конце октября. По мере зарастания вырубki соотношение затрат тепла на H и LE (отношение Боуэна) в течение исследуемого периода изменялось от 1.0 в апреле-мае до 0.3 в августе.

Ключевые слова. Лесные экосистемы, сплошная вырубка, метод турбулентных пульсаций, потоки явного и скрытого тепла, нетто-экосистемный обмен CO_2 , метод экспозиционных камер, Европейская территория России.

SEASONAL DYNAMICS OF CARBON DIOXIDE, SENSIBLE AND LATENT HEAT FLUXES ON A CLEAR-CUT AREA IN THE SOUTHERN TAIGA ZONE OF EUROPEAN PART OF RUSSIA

A.V. Olchev^{1),2)*}, *V.V. Mamkin*²⁾, *V.K. Avilov*²⁾, *A.C. Baybar*¹⁾, *D.G. Ivanov*²⁾,
*Yu.A. Kurbatova*²⁾

¹⁾ Faculty of Geography, Moscow State University,
1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia; *aoltche@gmail.com*

²⁾ A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy,
33, Leninsky Avenue, 109071, Moscow, Russia

Abstract. The aggregated study to assess the influence of clear-cutting on sensible (H) and latent (LE) heat fluxes, as well as on the main components of the net CO_2 exchange (NEE) between land surface and the atmosphere in a mixed forest located in subzone of the southern taiga in the European part of Russia was provided. The results of field measurements conducted using the eddy covariance and chamber methods from April to October 2016 showed significant seasonal and diurnal variability of H and LE , as well as NEE that was governed by both meteorological conditions and leaf area index (LAI) of regrown vegetation. The daily ecosystem respiration (RE) was always higher than daily gross primary production (GPP) of regrown herbaceous species and juvenile trees within the clear-cut area during the entire period of measurements. The mean NEE averaged for entire measuring period was $3.3 \pm 1.3 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \text{ day}^{-1}$. The maximal LE values were observed at the end of July ($8.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) whereas their minimal values (lower $1.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) – in April and at the end of October. The ratio of H and LE (Bowen ratio) is closely related to biomass of naturally regenerated vegetation and during the measuring period changed from 1.0 in April-May to 0.3 in August.

Keywords. Forest ecosystems, clear-cut, eddy covariance method, sensible and latent heat fluxes, net ecosystem exchange of CO_2 , chamber method, European part of Russia.

Введение

Леса в настоящее время покрывают около 31% поверхности суши, и играют важнейшую экологическую, социальную и экономическую роль в жизни человека. Регулируя процессы обмена парниковыми газами и, прежде всего, водяным паром (H_2O) и диоксидом углерода (CO_2) между земной поверхностью и атмосферой, а также воздействуя на радиационный, тепловой и гидрологический режим земной поверхности, леса оказывают существенное влияние на климат (IPCC, 2013).

Вырубка лесов, в том числе, связанная с плановыми рубками перестойных древостоев, а также с санитарной рубкой леса, приводит к существенным изменениям экологических и микроклиматических условий у земной поверх-

ности, вызывает изменения в структуре ее теплового, водного и углеродного баланса (Carlson, Groot, 1997; Williams et al., 2013). Происходящие изменения зависят от множества факторов, включая региональные климатические и погодные условия, рельеф местности, возраст и видовой состав древесной и травянистой растительности, уровень залегания грунтовых вод, запасы углерода и других минеральных веществ в почве, и др. В течение последних нескольких десятилетий вопросу изучения влияния сплошных рубок на окружающую среду был посвящен целый ряд экологических, геоботанических, почвенных и микроклиматических исследований (Молчанов и др., 2017; Keenan, Kimmins, 1993; Carlson, Groot, 1997; Amiro, 2001; Amiro et al., 2006; Radler et al., 2010; и др.). В частности исследования, проведенные Carlson и Groot (1997), а также Radler et al. (2010) показали, что размер и форма сплошной вырубке оказывают существенное влияние на режим солнечной радиации, ветровой и турбулентный режим, условия почвенного увлажнения, динамику температуры приземного слоя воздуха и почвы. В работах Amiro (2001) и Amiro et al. (2006) отмечается, что сплошная вырубка приводит к уменьшению потоков явного (H) и скрытого (LE) тепла, а также к росту потоков тепла в почву (G) по сравнению с ненарушенной лесной экосистемой. Также на сплошной вырубке по сравнению с ненарушенным лесом наблюдаются более низкие скорости депонирования углерода в дневное время при довольно слабых различиях ночной эмиссии CO_2 с земной поверхности. Молчанов и др. (2017) отмечали значительную пространственно-временную изменчивость почвенного дыхания на свежей вырубке и ее существенный вклад в суммарные CO_2 потоки, обусловленные главным образом активными процессами разложения и минерализации мертвых корней и накопившегося древесного опада и отходов лесозаготовки на поверхности почвы. Анализируя временную изменчивость потоков CO_2 и H_2O на сплошной вырубке, Williams et al. (2014) отмечали, что наиболее резкие изменения потоков тепла, CO_2 и H_2O в лесной экосистеме происходят в первые годы после проведения сплошной рубки. По мере зарастания вырубке отмечается увеличение валовой первичной продукции (GPP) в балансе CO_2 при относительно постоянной эмиссии CO_2 с поверхности почвы. При этом как показал Amiro (2010) на основе анализа результатов пульсационных измерений в антропогенно-нарушенных экосистемах, интегральные значения экосистемного дыхания (RE) за год могут превышать значения GPP восстанавливаемой на вырубке растительности на протяжении значительного интервала времени, достигающего для некоторых типов лесных экосистем 20 лет и более.

Территория, занимаемая южнотаежными хвойными лесами на Европейской территории России (ЕТР), характеризуется, с одной стороны, достаточно высокой степенью хозяйственного освоения, а с другой, довольно низким уровнем исследованности возможного влияния различных видов лесохозяйственной мероприятий на потоки парниковых газов между земной поверхностью и атмосферой. Учитывая важное значение парниковых газов в

современных климатических изменениях, а также существенный недостаток экспериментальных данных об изменении составляющих теплового и углеродного баланса антропогенно-нарушенных лесных экосистем на территории России, в рамках данного исследования на примере свежей сплошной вырубке в типичной лесной экосистеме подзоны южной тайги на ЕТР был проведен комплексный эксперимент по оценке влияния сплошных рубок на потоки H , LE и на составляющие нетто обмена CO_2 (NEE) сплошной вырубке с атмосферой с применением пульсационных (eddy covariance) и камерных методов измерений.

Объекты и методы

Объект исследования

В качестве объекта исследования был выбран участок хорошо дренированного леса со сплошной свежей вырубкой (рис. 1) площадью около 4.5 га. Участок расположен в зоне рационального природопользования Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника, ЦЛГПБЗ (Тверская область, Нелидовский район, 56°26' с.ш., 33°03' в.д.).

Исследуемая территория относится к атлантико-континентальной европейской области умеренного пояса с умеренно-теплым летом и длинной холодной зимой с устойчивым снежным покровом. В течение года регион находится под преобладающим влиянием умеренных морских и континентальных воздушных масс. Изменчивость атмосферной циркуляции создает на исследуемой территории большую неустойчивость режима увлажнения и температуры. Согласно данным метеорологических наблюдений, проводимым в ЦЛГПБЗ начиная с 1963 года, среднегодовая температура воздуха составляет около 4.1°C. Среднемесячная температура самого теплого месяца июля составляет 17.1°C, а самого холодного (января) – -10.0°C. Годовое количество осадков обычно не превышает 700 мм (Oltchev et al., 2002).

Растительный покров района исследований представлен типичными для южной тайги растительными сообществами. Преобладают различные типы ельников, включая неморальные (с липой, клёном и вязом), широколиственные (с дубравными видами), папоротниковые, зеленомошные, кисличные, чернично-кисличные, черничные и сфагново-черничные. Встречаются сосняки сфагновые осоково-брусничные с болотными кустарничками. Широко распространены верховые сфагновые болота (Пузаченко и др., 2007).

Сплошная рубка леса на исследуемом участке была произведена в марте-апреле 2016 г. После расчистки участка и вывоза древесины на вырубке оставалось большое количество пней, древесного опада и порубочных остатков. В составе древесного яруса вырубленного леса преобладали ель, берёза и осина. Широколиственные породы деревьев в древостое были представлены отдельными экземплярами клена. Почвы на исследуемом участке – дерново-слабоподзолистые. Интенсивное возобновление растительного покрова (прежде всего, травянистой и кустарничковой растительности) началось со второй

половины апреля, вслед за сходом снежного покрова и устойчивым переходом температуры верхних почвенных горизонтов в область положительных значений. Начиная с конца июля, начался интенсивный рост подроста осины. В августе средняя для исследуемой вырубке величина листового индекса (LAI) достигала $2.5 \text{ м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$, а средняя высота древесного подроста составила 70-90 см. Запас органического углерода в верхнем 10-сантиметровом слое почвы на вырубке варьировал от 2.7 до 5.8 %.

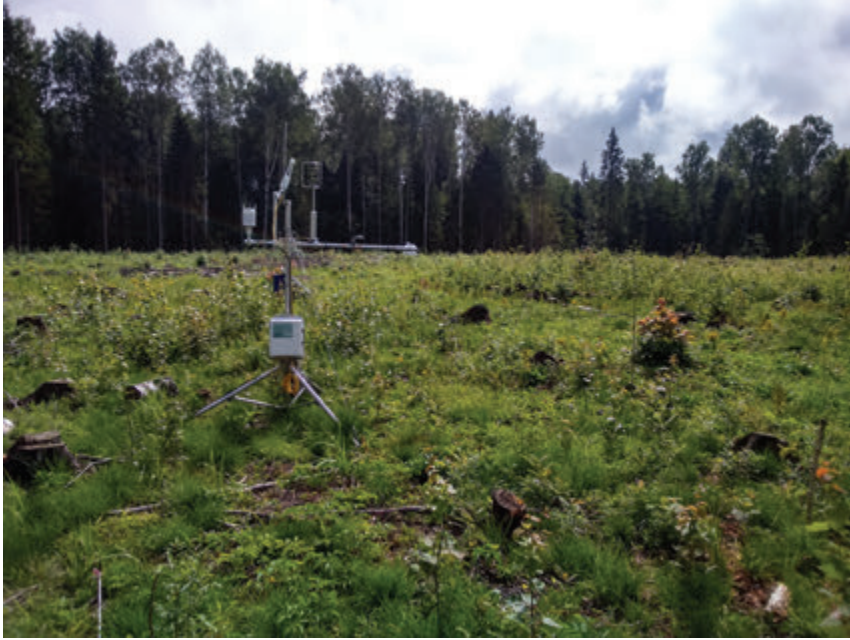


Рисунок 1. Станция мониторинга для проведения наблюдений за микроклиматическими условиями, и за потоками H , LE и NEE на исследуемой сплошной вырубке

Пульсационные и микроклиматические измерения

Для проведения непрерывных наблюдений за потоками CO_2 , H и LE на исследуемой сплошной вырубке в начале апреля 2016 года была установлена мачта-трипод CM106B (Campbel Sci. Inc., США) высотой 3 м, на которой было установлено оборудование для проведения микроклиматических наблюдений и измерения потоков тепла, H_2O и CO_2 . Мачта располагалась в северной части вырубке (на расстоянии 190 м от южного края и в 90 м – от северного края вырубке). Такое расположение измерительной мачты было выбрано с учетом преобладающего на исследуемой территории в теплую половину года южного направления ветра для уменьшения влияния на измеряемые потоки, окружающего вырубку леса.

Приборы для пульсационных измерений были установлены на высоте 2.4 м и включали акустический 3-х компонентный анемометр Gill WindMaster Pro (Gill Instruments, Великобритания) и газоанализатор открытого типа LI-7500A (LI-COR Inc., США). Для получения данных о температуре и относительной влажности воздуха, атмосферном давлении, количестве осадков, а также о скорости и направлении ветра на высоте 2 м над земной поверхностью была

установлена автоматическая метеостанция WXT520 (Vaisala, Финляндия). Потоки длинноволновой и коротковолновой радиации измерялись 4-х компонентным радиометром NR01 (Hukseflux, Нидерланды), а фотосинтетически активная радиация (ФАР) датчиком LI-190SB (LI-COR Inc., США). Приборы для измерения радиационных потоков были установлены на высоте 1.9 м. Измерения потока тепла в почву проводились с помощью 3 датчиков HFP01SC (Hukseflux, Нидерланды), установленных на глубине 8.5 см под слоем лесной подстилки. Для определения температуры и объёмной влажности верхних почвенных горизонтов (до глубины 10 см) вблизи измерительной станции были установлены 4 рефлектометра CS655 (Campbell Sci. Inc., США).

Измерения были начаты 7 апреля 2016, сразу же после вывода с вырубке лесозаготовительной техники и проводились непрерывно в течение всего вегетационного сезона до конца октября 2016 г. Пульсационные измерения составляющих скорости ветра, температуры, CO_2 и H_2O проводились с частотой 10 Гц. Данные микроклиматических измерений регистрировались с частотой 0.1 Гц. Для сбора и накопления данных измерений использовался логгер CR3000 (Campbell Sci. Inc., США).

Обработка и анализ данных пульсационных измерений

Обработка результатов пульсационных измерений проходила согласно принятым в международной практике рекомендациям (Aubinet et al., 2012). Расчёт потоков производился для 30-минутных временных интервалов с помощью программного обеспечения EddyPro (https://www.licor.com/env/products/eddy_covariance/eddypro.html) с учетом всех необходимых поправок: поправки на отклонение направления набегающего воздушного потока от горизонтали, коррекции системы координат, удаления тренда временных рядов, максимизации ковариации, поправки на флуктуации плотности воздуха, и др. Для оценки качества рассчитанных потоков применялся ряд стандартных статистических тестов, предусмотренных используемым программным обеспечением EddyPro. Каждому полученному значению присваивался индекс, характеризующий уровень надежности измеренных данных и определяемый по 9-бальной шкале (Foken, et al., 2004). Согласно общепринятой методологии (Miliavacca et al., 2009) при расчетах потоков, учитывалось изменение запасов тепла, водяного пара и CO_2 в столбе воздуха между уровнем расположения измерительного датчика и поверхностью почвы за соответствующие интервалы времени. Данные не соответствующие критерию качества (индекс менее 5), характеризующиеся аномально высокими отклонениями от средних величин, полученные при условиях слабовыраженной турбулентности (динамическая скорость $u_* < 0.09 \text{ м с}^{-1}$), а также измеренные при атмосферных осадках и высокой относительной влажности воздуха исключались из дальнейшего рассмотрения.

Анализ и фильтрация полученных данных по критерию пороговых значений u_* , процедура заполнения пропусков, а также расчет величин RE и GPP осуществлялся при помощи программного обеспечения ReddyProc (<https://>

www.bgc-jena.mpg.de/bgi/index.php/Services/REddyProcWebRPackage). За основу метода определения пороговых значений динамической скорости был взят метод, предложенный Papale et al. (2006). Процедура заполнения пропусков и разделения *NEE* на *RE* и *GPP* основывалась на методе, разработанном Reichstein et al. (2005).

Расчет площади зоны охвата на которой был сгенерирован поток, измеряемый пульсационным оборудованием (*footprint*), проводился с использованием модели, предложенной Kljun et al. (2004). В течение всего периода измерений минимальный радиус зоны охвата днём (08:00 - 20:00) составлял в среднем около 15 м, а ночью около 22 м, что было значительно меньше минимального расстояния от измерительной станции до ближайшей опушки леса (90 м).

Измерения RE методом экспозиционных камер

Для проверки проводимых с помощью пульсационного метода оценок величины *RE*, а также для определения пространственной неоднородности *RE* в пределах вырубки в исследовании была проведена серия прямых измерений *RE* методом экспозиционных камер (*REch*) по закрытой схеме. Измерения *REch* проводились с помощью портативной системы, состоящей из прозрачной напочвенной камеры и инфракрасного газоанализатора LI-840 (LI-Cor Inc., США), в виде интенсивных полевых компаний на протяжении светового дня один раз в 1-3 недели в период с мая по сентябрь 2016 года. При измерениях измерительная камера накрывалась светонепроницаемым светоотражающим чехлом. Площадь основания камеры составляла 0.28 м². Измерения на каждом участке проводились в 5-кратной повторности. Расчёт величины *REch* производился по скорости изменения концентрации CO₂ внутри экспозиционной камеры (Иванов и др., 2017). Время экспозиции камеры при каждом измерении составляло 200 с.

Результаты

Метеорологические условия

Погодные условия в течение всего периода измерений характеризовались значительной изменчивостью и, в целом, были близки к средним многолетним значениям. В течение весны среднесуточная температура изменялась от 1.3°C в апреле до 18.6°C в мае. В первую половину лета температуры достигли максимума (23.8°C) (рис. 2). В июле-августе на фоне незначительного понижения среднесуточных значений температуры отмечались их значительные колебания в пределах от 11.5 до 23.8°C. Осенью температура постепенно снижалась от 15.8°C в середине сентября до отрицательных значений – в середине октября (до -1.7°C).

Наибольшая интенсивность выпадающих осадков наблюдалась в летний период, хотя в целом осадки были равномерно распределены в течение всего периода измерений, что обеспечило достаточное увлажнение верхних почвен-

ных горизонтов ($0.34-0.48 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$). Сумма осадков за весь период измерений составила 459 мм.

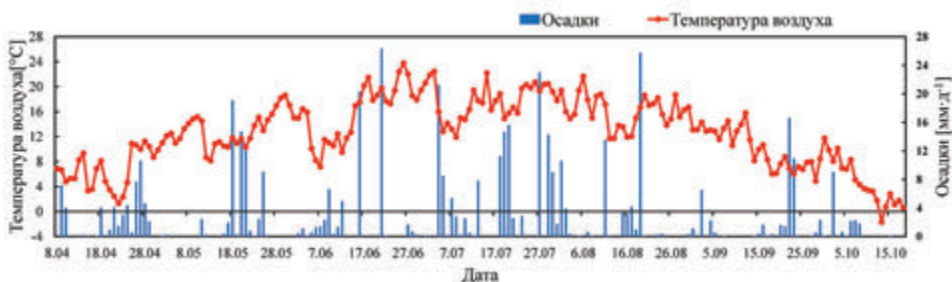


Рисунок 2. Сезонная динамика среднесуточных значений температуры воздуха и суточных сумм осадков за весь период измерений

Динамика приходящей суммарной солнечной радиации (рис. 3) и радиационного баланса (Rn) в период с апреля по июль характеризовалась значительной изменчивостью. Суммарная солнечная радиация изменялась в диапазоне от 2.0 до 26.6 МДж·м⁻² в день, и Rn – от 2.5 до 12.8 МДж·м⁻² в день, соответственно. Максимальные значения приходящей солнечной радиации и Rn наблюдались в июне – июле. Начиная со второй половины июля, прослеживается тенденция к постепенному снижению суточных сумм суммарной солнечной радиации и Rn . К началу октября величины суммарной радиации и Rn достигли минимальных значений за весь период измерений: 1.1 МДж·м⁻² в день и -0.8 МДж·м⁻² в день, соответственно.

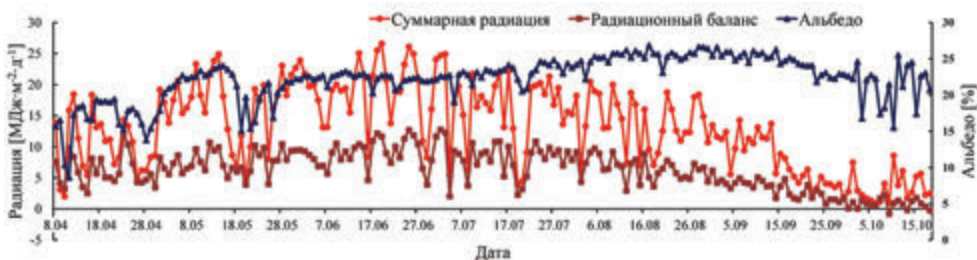


Рисунок 3. Сезонная динамика суточных сумм радиационного баланса, суммарной радиации и среднесуточных значений альбедо

Альбедо поверхности сплошной вырубki в первые декады после завершения лесозаготовительных работ было минимальным и в зависимости от погодных условий и условий почвенного увлажнения изменялось от 6 до 17%. С началом активного роста травянистой растительности на вырубке наметился устойчивый рост величины альбедо. Резкие снижения до 9% наблюдались лишь в периоды облачной погоды и во время интенсивного выпадения атмосферных осадков. В августе альбедо достигло своего максимума – около 27%. Межсуточная изменчивость альбедо в этот период была довольно низкой. К концу октября альбедо снизилось до 20%.

Средняя скорость ветра (при 30 минутном осреднении) за весь период измерений составила $0.7 \pm 0.5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ($\pm \text{SD}$, стандартное отклонение). Скорости ветра выше $2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ отмечались лишь на протяжении довольно коротких интервалов времени. На протяжении всего периода наблюдений преобладали ветра южного (днем) и северного (ночью) направления. Динамическая скорость (u^*) в среднем составила $0.02 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ в ночное время и $0.1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ – в дневное. Стратификация приземного слоя воздуха в дневное время была в основном неустойчивой при параметре устойчивости Монины-Обухова (L^{-1}) ≈ 0.06 .

Потоки H и LE

Сезонная динамика H и LE отличалась значительной изменчивостью (рис. 4). В условиях относительно равномерного распределения осадков в течение всего периода измерений и, как следствие, незначительных колебаний объёмной влажности почвы, динамика потоков тепла определялась в основном притоком солнечной радиации и темпами восстановления на исследуемой вырубке растительного покрова.

В весенние месяцы с ростом температуры наблюдалась устойчивая тенденция к росту потоков H и LE . Суточные суммы потоков H изменялись в широком диапазоне от -0.4 до $7.6 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ в день, а LE – от 0.8 до $6.6 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ в день. Отношение Боуэна (β), определяемое как отношение затрат тепла на турбулентный теплообмен и на испарение, при этом варьировало от -0.2 до 2.3 . В начале лета величины потоков H и LE были почти одинаковыми ($\beta \approx 1$), изменяясь в зависимости от погодных условий от 0.7 до $7.0 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ в день.

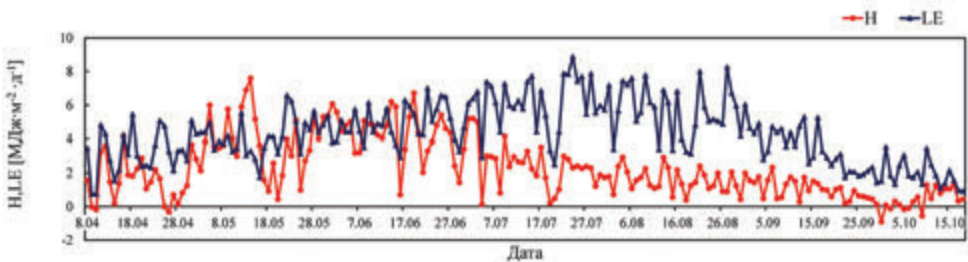


Рисунок 4. Сезонная динамика суточных сумм затрат тепла на явный (турбулентный) теплообмен (H) и на испарение (LE)

Начиная с конца июня на фоне активного роста на вырубке травянистой и кустарничковой растительности, а также древесного подроста, на фоне увеличения значений LE отмечается постепенное снижение H . Величина LE достигла максимальных значений в конце июля ($8.9 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ в день). Величина β в этот период снизилась до значений менее 0.5 . В августе и сентябре β отличалось незначительной изменчивостью варьируя в пределах от 0.1 до 0.5 . В середине октября отмечается небольшой рост β до 0.8 . Поток H к концу сентября снизился до $-0.9 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ в день, а в середине октября составил около $1.0 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ в день. Величина LE достигла минимальных значений в конце октября, составив $0.9 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ в день.

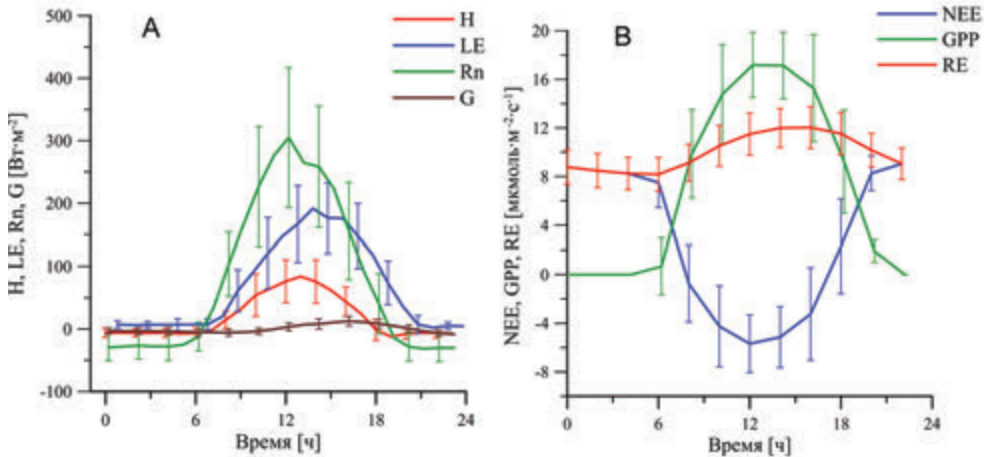


Рисунок 5. Средний суточный ход составляющих теплового баланса и CO₂ обмена для августа 2016.

Вертикальные отрезки обозначают величину стандартного отклонения. (А) – радиационный баланс (Rn), затраты тепла на турбулентный теплообмен (H), затраты тепла на испарение (LE) и поток тепла в почву (G). (В) – нетто CO₂ обмен (NEE), валовая первичная продукция (GPP) и экосистемное дыхание (RE).

Суточная динамика потоков тепла (H и LE) характеризовалась в разные сезоны года существенными различиями и отличалась значительной изменчивостью. Отличия главным образом были обусловлены сезонной динамикой значений Rn , а также изменением β . В августе осредненные за месяц значения Rn в полуденные часы превышали $300 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ (рис. 5). Величина H была немногим больше $80 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, а LE – около $190 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$. Максимальные значения потоков наблюдались в послеполуденное время. Величина потока G увеличивалась в течение первой половины дня (до $\sim 16:00$) и составляла около $12 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$. Ночью значения Rn были отрицательными, снижаясь до $-30 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ и менее, величина H опускалась до $-7 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, LE – до $2 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, а G достигала $-9 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$.

Потоки CO₂

Анализ результатов измерений турбулентных потоков CO₂ показал, что исследуемая свежая вырубка служила источником CO₂ для атмосферы в течение всего периода наблюдений. В период с апреля по июль величина NEE устойчиво увеличивалась от 1.6 до $7.2 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$ в день (рис. 6). Некоторое уменьшение суточных значений NEE в конце июля – начале августа (до $1.5 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$ в день) было обусловлено главным образом активным ростом на вырубке травянистой и кустарничковой растительности, а также древесного подроста (среднее значение LAI на вырубке составило в начале августа около $2.5 \text{ м}^2\cdot\text{м}^{-2}$). К октябрю на фоне снижения температуры воздуха и приходящей суммарной солнечной радиации интенсивность фотосинтеза и дыхания рас-

тельности, а также дыхания почвы существенно снизилась, что привело к уменьшению значений NEE до 0.8 гС м^{-2} в день. Интегральное значение NEE , осредненное за весь период измерений, составило $3.3 \pm 1.3 \text{ гС м}^{-2}$ в день.

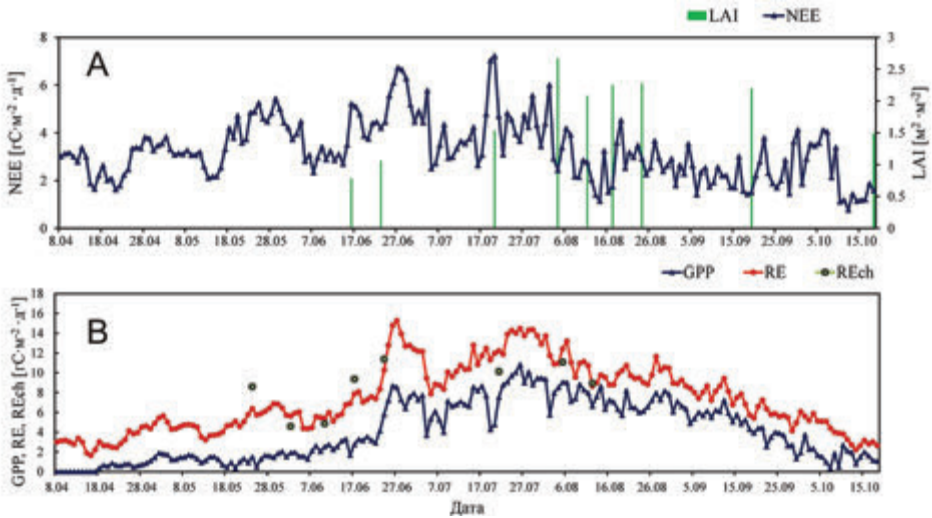


Рисунок 6. Сезонная динамика суточных сумм: (А) – нетто CO_2 обмена (NEE) и листового индекса (LAI); (В) – валовой первичной продукции (GPP), экосистемного дыхания (RE) и дыхания экосистемы ($REch$), измеренной методом экспозиционных камер

Результаты расчетов значений RE и GPP по данным измерений NEE показали устойчивую тенденцию к их росту с апреля по вторую половину июля на фоне роста температуры и приходящей солнечной радиации. Величины RE изменялись от 1.6 до 15.3 гС м^{-2} в день, а GPP – от 0.0 до 11.0 гС м^{-2} в день. В середине апреля величина NEE из-за отсутствия на вырубке какой-либо фотосинтезирующей растительности полностью определялась эмиссией CO_2 с поверхности почвенного покрова. Существенный вклад в величину RE вносили процессы разложения многочисленных порубочных остатков. Начиная с августа, отмечается общее снижение как значений RE , так и GPP . Величина RE в октябре составила 2.2 гС м^{-2} в день, а GPP – 0.4 гС м^{-2} в день. Как видно из рис. 6 рассчитанные на основе результатов пульсационных измерений значения RE достаточно хорошо согласуются с величинами $REch$, полученными с использованием метода экспозиционных камер. Коэффициент детерминации (r^2) между значениями RE и $REch$ составил 0.622 (при уровне значимости $p < 0.05$). В среднем за весь период измерений значение RE ($\pm SD$, стандартное отклонение) составило $7.4 \pm 3.4 \text{ гС м}^{-2}$ в день, а GPP – $4.1 \pm 3.0 \text{ гС м}^{-2}$ в день.

Динамика среднесуточных значений NEE отличалась значительной изменчивостью в течение всего периода измерений. В весенние месяцы изменение значений NEE практически полностью определялось динамикой RE . В летние месяцы их изменение определялось уже не только величиной RE , существенно увеличившейся на фоне роста температуры, но также и величиной GPP , активно восстанавливающегося на вырубке растительного покрова.

Рассмотрим в качестве примера осредненную суточную динамику значений NEE , RE и GPP в августе (рис. 5). В ночное время величина NEE целиком определялась RE , составляя в среднем 8.5 ± 1.5 мкмоль·м⁻²·с⁻¹. В утренние часы, на фоне увеличения приходящей солнечной радиации, наблюдался резкий рост значений GPP существенно превышающий скорости изменения RE . Максимальные величины GPP (17.6 ± 3.3 мкмоль·м⁻²·с⁻¹) наблюдались в околополуденное время, в то время как RE , следуя за изменениями температуры, достигало максимума в послеполуденные часы (около 16:00) – 12.1 ± 1.7 мкмоль·м⁻²·с⁻¹. За счет высоких значений GPP , существенно превышающих величины RE , исследуемая вырубка в дневное время служила стоком CO_2 из атмосферы. Максимальные скорости поглощения CO_2 поверхностью вырубки (сток CO_2 из атмосферы) наблюдались в околополуденное время (-5.9 ± 3.0 мкмоль·м⁻²·с⁻¹).

Обсуждение

Результаты проведенных экспериментальных исследований потоков H и LE , а также NEE на сплошной вырубке в течение первого года после проведения лесохозяйственных мероприятий показали их значительную временную изменчивость. Ключевыми факторами, определяющими их динамику, служили температура и приходящая солнечная радиация, а также атмосферные осадки, обеспечившие на протяжении всего исследуемого периода на изучаемом участке достаточные условия увлажнения. Существенное влияние на сезонную динамику потоков H и LE , а также NEE оказывало активное возобновление травянистой и кустарничковой растительности, а также древесного подроста. При этом данные измерений показывают, что, несмотря на активное восстановление растительного покрова, суточные значения RE на вырубке устойчиво превышали GPP в течение всего периода измерений. Потоки LE превышали H на протяжении всего летне-осеннего периода, прежде всего благодаря достаточным условиям увлажнения и высокой скорости транспирации растительного покрова. Важно отметить, что все выявленные закономерности в целом хорошо согласуются с результатами аналогичных исследований, проведенных на протяжении последних лет в ряде Европейских стран и в Канаде, и показавших, в частности, что сплошные вырубки в годовом балансе в течение первых нескольких лет после рубки служат устойчивым источником CO_2 для атмосферы (Amiro, 2010; Williams et al., 2014). Отмеченная в работах Amiro (2001) и Amiro et al. (2006) тенденция к снижению потоков H и LE в лесной экосистеме после проведения сплошной рубки, в рамках проведенного исследования проявляется, прежде всего, в существенном уменьшении H , что хорошо видно из результатов сравнения измеренных потоков с данными, представленными в обзоре Wilson et al. (2002) и обобщающими результаты пульсационных измерений потоков в экосистемах хвойных и лиственных лесов умеренных широт Центральной и Северной Европы, а также Северной Америки, полученными в рамках реализации программы FLUXNET (<http://fluxnet.fluxdata.org/>). Выявленное значительное снижение

потоков H по сравнению с LE на исследуемой вырубке привело к снижению величины β в летне-осенний период до значений менее 0.5 (0.1-0.5). Сравнивая полученные данные с результатами, обобщенными Wilson et al. (2002), можно отметить, что значения β на вырубке в период активной вегетации в июле-августе было существенно ниже значений β , полученных как для хвойных лесов в летний период (β в среднем изменяется от 0.5 до 1.2), так и для лиственных лесов умеренных широт (β варьирует от 0.25 до 0.6). Учитывая, что в древесном ярусе вырубленного участка леса преобладали ель, берёза и осина, то можно утверждать, что в период активной вегетации в июле-августе сплошная рубка привела к существенному снижению значений β .

При интерпретации полученных результатов необходимо учитывать, что все значения потоков были получены при оптимальных для роста и развития древесной и травянистой растительности условиях увлажнения. Можно предположить, что при недостатке доступной почвенной влаги для роста растений и при снижении их транспирации различия между значениями β на вырубке и в лесных экосистемах могут быть менее существенными и приближаться к диапазонам изменения β для лиственных и хвойных лесов. При анализе соотношения H и LE на вырубке важно также учитывать и изменение Rn земной поверхности, которое в значительной степени определяется величиной альбедо. В ходе экспериментов величина альбедо на вырубке варьировала в среднем от 15 до 25%, что было существенно выше средних значений альбедо для смешанного леса (12-15%) в летний период полученных, например, в ходе исследований, проведенных McCaughey (1987).

При анализе данных по потокам CO_2 важно отметить высокую стабильность диапазона изменения соотношения значений GPP и RE на вырубке. На протяжении летних месяцев оно изменялось от 0.4 до 0.8. В свою очередь, по данным Falge et al. (2002) соотношение GPP и RE для темнохвойных лесов, полученное на основе анализа результатов пульсационных измерений в центральной и северной Европе, в летние месяцы обычно варьирует от 1.2 до 2.0. Сходные оценки для лиственных лесов умеренных широт центральной Европы составили 1.1-2.3. Таким образом, в абсолютном большинстве рассмотренных хвойных и лиственных древостоев величина GPP в летний период была устойчиво выше значений RE в широком диапазоне температурных и влажностных условий (Falge et al., 2002). Важно отметить, что все полученные результаты достаточно хорошо согласуются с результатами исследований потоков CO_2 в антропогенно-нарушенных лесных экосистемах Северной Америки, обобщенных Amiro et al. (2010).

Важным элементом проведенных исследований явилось использование двух альтернативных подходов для определения величины RE на вырубке (метода турбулентных пульсаций и экспозиционных камер), что позволило провести дополнительную верификацию и оценить качество проведенных измерений потоков. Показанное хорошее соответствие оценок RE обоими методами в разные интервалы времени, очевидно, подтверждает репрезентативность проведенного экспериментального исследования (рис. 6).

В рамках проведенного исследования в целом не затрагивался вопрос возможного влияния граничных эффектов (возникающих вблизи наветренных и подветренных опушек леса) на процессы турбулентного обмена и вертикальные потоки над исследуемой сплошной вырубкой. Как показано в исследованиях Мухартовой и др. (2015) и Левашовой и др. (2015) характерной особенностью смоделированных полей ветра и коэффициентов турбулентности над земной поверхностью с неоднородным растительным покровом является значительная деформация полей ветра и турбулентного обмена в приземном слое атмосферы вблизи границ раздела растительных сообществ с разной структурой. В частности, на подветренной стороне препятствий (подветренный край вырубки) часто отмечается наличие циркуляционных движений, характеризующихся противоположно направленными по отношению к ведущему потоку движениями воздуха в приповерхностном слое. Подобные эффекты очевидно приводят к существенным возмущениям в переносе тепла, H_2O и CO_2 между земной поверхностью и атмосферой. Пренебрежение подобными эффектами, очевидно, может привести к погрешностям при определении вертикальных потоков при измерениях как у земной поверхности, так и на уровнях, превышающих высоту окружающего вырубку древостоя (Mamkin et al., 2016). В ходе проведенных измерений оборудование для измерения потоков на вырубке было установлено на достаточно большом удалении от опушки леса, чтобы избежать возможных адвективных (возмущающих) эффектов (например, восходяще-нисходящих движений воздуха у края вырубки). Выполненное в рамках исследования определение площади зоны влияния на потоки на вырубке показало ее незначительные размеры, что обеспечило минимальное воздействие горизонтальной адвекции на измеряемые потоки на высоте установки измерительной аппаратуры.

Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что сплошная вырубка оказывает значительное влияние на динамику микроклиматических параметров, а также на потоки H , LE и составляющие NEE . Наряду со значительными изменениями приходящей солнечной радиации на протяжении периода измерений важным фактором изменчивости потоков на поверхности вырубки явилось ее постепенное зарастание травянистой растительностью и древесным подростом. Альbedo поверхности на фоне зарастание вырубки имело тенденцию к росту (от 15 до 20%), достигая максимальных значений в июле-августе. По мере восстановления растительного покрова и увеличения LAI соотношение затрат тепла на H и LE (отношение Боуэна) изменялось в сторону роста доли затрат тепла на LE (от 1.0 до 0.3). На протяжении всего периода измерений вырубку служила источником CO_2 для атмосферы ($NEE=3.3\pm 1.3$ гС·м⁻² в день), несмотря на превышение значений GPP (до 17.6 ± 3.3 мкмоль·м⁻²·с⁻¹) над RE (до 12.1 ± 1.7 мкмоль·м⁻²·с⁻¹) в околополуденные часы в летние месяцы. Проведенное сравнение значений RE , выполненное пульсационным и камерным методом, показало их достаточно хорошее

соответствие ($r^2=0.622$, $p<0.05$), подтверждающее репрезентативность результатов выполненного экспериментального исследования.

Учитывая многообразие факторов, влияющих на процессы переноса тепла, H_2O и CO_2 на поверхности сплошных вырубок, результаты проведенных исследований необходимо рассматривать лишь как частный случай возможных изменений составляющих углеродного и водного баланса лесных экосистем после проведения сплошных рубок. Для выявления всего спектра возможных последствий лесохозяйственной деятельности для биосферы и климатической системы необходимо продолжение комплексных исследований процессов взаимодействия лесных экосистем и атмосферы с использованием как экспериментальных, так и теоретических (модельных) подходов.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского Научного Фонда (грант 14-14-00956-П).

Литература

Иванов Д.Г., Авилов В.К., Курбатова Ю.А. 2017. Потоки CO_2 на верховом болоте в южнотаежной зоне европейской части России в летний период. – Сибирский экологический журнал, № 2, с. 109-118.

Левашова Н.Т., Мухартова Ю.В., Давыдова М.А., Шапкина Н.Е., Ольчев А.В. 2015. Применение теории контрастных структур для описания поля скорости ветра в пространственно-неоднородном растительном покрове. – Вестник Московского университета. Серия 3. Физика и Астрономия, № 3, с. 3-10.

Молчанов А.Г., Курбатова Ю.А., Ольчев А.В. 2017. Влияние сплошной вырубki леса на эмиссию CO_2 с поверхности почвы. Известия Российской академии наук. Серия биологическая, № 2, с. 190-196.

Мухартова Ю.В., Левашова Н.Т., Ольчев А.В., Шапкина Н.Е. 2015. Применение двумерной модели для описания турбулентного переноса CO_2 в пространственно-неоднородном растительном покрове. – Вестник Московского университета. Серия 3. Физика и Астрономия, № 1, с. 15-22.

Пузаченко Ю.Г., Желтухин А.С., Козлов Д.Н., Кораблёв Н.П., Федяева М.В., Пузаченко М.Ю., Сиунова Е.В. 2007. Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник: популярный очерк. – М., Деловой мир, 80 с.

Amiro B.D. 2001. Paired-tower measurements of carbon and energy fluxes following disturbance in the boreal forest. – *Global Change Biology*, vol. 7, pp. 253-268.

Amiro B.D., Barr A.G., Black T.A., Iwashita H., Kljun N., McCaughey J.H., Morgenstern K., Murayama S., Nescic Z., Orchansky A.L., Saigusa N. 2006. Carbon, energy and water fluxes at mature and disturbed forest sites, Saskatchewan, Canada. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 136, pp. 237-251.

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., Randerson J.T., Starr G., Xiao J. 2010.

Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America. – *J. Geophysical Research*, vol. 115, G00K02.

Aubinet M., Vesala T., Papale D. 2012. *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*. – Springer Atmospheric Sciences, Dordrecht, The Netherlands: Springer Verlag, 438 p.

Carlson D.W., Groot A. 1997. Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 87, pp. 313-329.

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., Guomundsson J., Hollinger D., Kowalski A.S., Katul G., Law B.E., Malhi Y., Meyers T., Monson R.K., Munger J.W., Oechel W., Paw U K.T., Pilegaard K., Rannik U., Rebmann C., Suyker A., Valentini R., Wilson K., Wofsy S. 2002. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 113, pp. 53-74.

Foken T., Göckede M., Mauder M., Mahrt L., Amiro B.D., Munger J.W. 2004. Post-field data quality control. – In: Lee X., Massman W.J., Law B. (eds.). *Handbook of micrometeorology: a guide for surface flux measurement and analysis*. – Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, pp. 81-108.

Giasson M.-A., Coursolle C., Margolis H.A. 2006. Ecosystem-level CO₂ fluxes from a boreal cutover in eastern Canada before and after scarification. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 140 (1-4), pp. 23-40.

IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013, 1535 p.

Keenan R.J., Kimmins J.P. 1993. The ecological effects of clear-cutting. – *Environmental Reviews*, vol. 1, pp. 121-144.

Kljun N., Calanca P., Rotach M.W., Schmid H.P. 2004. A simple parameterisation for flux footprint predictions. – *Boundary Layer Meteorology*, vol. 112, pp. 503-523.

Kowalski S., Sartore M., Burlett R., Berbigier P., Lostau D. 2003. The annual carbon budget of a French pine forest (*Pinus pinaster*) following harvest. – *Global Change Biology*, vol. 9, pp. 1051-1065.

Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Mukhartova Yu, Krupenko A., Ivanov D., Levashova N., Olchev A. 2016. Changes in net ecosystem exchange of CO₂, latent and sensible heat fluxes in a recently clear-cut spruce forest in western Russia: results from an experimental and modeling analysis. – *Environmental Research Letters*, vol. 11(12), 125012.

McCaughey J.H. 1987. The albedo of a mature mixed forest and a clear-cut site at Petawawa, Ontario. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 40(3), pp. 251-263.

Migliavacca M., Meroni M., Manca G., Matteucci G., Montagnani L., Grassi G., Zenone T., Teobaldelli M., Goded I., Colombo R., Seufert G. 2009. Seasonal and interannual patterns of carbon and water fluxes of a poplar plantation under peculiar eco-climatic conditions. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 149(9), pp. 1460-1476.

Oltchev A., Cermak J., Gurtz J., Kiely G., Nadezhdina N., Tishenko A., Zappa M., Lebedeva N., Vitvar T., Albertson J.D., Tatarinov F., Tishenko D., Nadezhdin V., Kozlov B., Ibrom A., Vygodskaya N., Gravenhorst G. 2002. The response of the water fluxes of the

boreal forest region at the Volga's source area to climatic and land-use changes. – J. Physics and Chemistry Earth, vol. 27 (9-10), pp. 675-690.

Papale D., Reichstein M., Aubinet M., Canfora E., Bernhofer C., Kutsch W., Longdoz B., Rambal S., Valentini R., Vesala T., Yakir D. 2006. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. – Biogeosciences, vol. 3, pp. 571-583.

Radler K., Oltchev A., Panferov O., Klinck U., Gravenhorst G. 2010. Radiation and temperature responses to a small clear-cut in a spruce forest. – Open Geography Journal, vol. 3, pp. 103-114.

Reichstein M., Falge E., Baldocchi D., Papale D., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Gilmanov T., Granier A., Grünwald T., Havránková 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. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. – Global Change Biology, vol. 11, pp. 1424-1439.

Rodrigues A., Pita G., Mateus J., Kurz-Besson C., Casquilho M., Cerasoli S., Gomes A., Pereira J. 2011. Eight years of continuous carbon fluxes measurements in a Portuguese eucalypt stand under two main events: Drought and felling. – Agricultural and Forest Meteorology, vol. 151(4), pp. 493-507.

Williams C.A., Vanderhoof M.K., Khomik M., Ghimire B. 2014. Post-clearcut dynamics of carbon, water and energy exchanges in midlatitude temperate, deciduous broadleaf forest environment. – Global Change Biology, vol. 20(3), pp. 992-1007.

Wilson K., Goldstein A., Falge E., Aubinet M., Baldocchi D., Berbigier P., Bernhofer C., Ceulemans R., Dolman H., Field C., Grelle A., Ibrom A., Law B.E., Kowalski A., Meyers T., Moncrieff J., Monson R., Oechel W., Tenhunen J., Valentini R., Verma S. 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. – Agricultural and Forest Meteorology, vol. 113(1-4), pp. 223-243.

References

Ivanov D.G., Avilov V.K., Kurbatova Yu.A. 2017. CO₂ fluxes at south taiga bog in the European part of Russia in summer. – Contemporary Problems of Ecology, vol. 10(2), pp. 97-104.

Levashova N.T., Muhartova J.V., Davydova M.A., Shapkina N. E., Oltchev A.V. 2015. The application of the theory of contrast structures for describing wind field in spatially heterogeneous vegetation cover. – Moscow University Physics Bulletin, vol. 70(3), pp. 167-174.

Molchanov A.G., Kurbatova Yu. A., Olchev A.V. 2017. Effect of Clear-Cutting on Soil CO₂ Emission. – Biology Bulletin, vol. 44 (2), pp. 218-223.

Mukhartova Yu. V., Levashova N. T., Olchev A. V., Shapkina N. E. 2015 Application of a 2D model for describing the turbulent transfer of CO₂ in a spatially heterogeneous vegetation cover. – Moscow University Physics Bulletin, vol. 70(1), pp. 14-21.

Puzachenko Yu. G., Zheltukhin A. S., Kozlov D. N., Korablyov N. P., Fedyeva M. V., Puzachenko M. Yu., Siunova E. V. 2007. *Centralno-Lesnoy gosudarstvenniy prirodniy biosferniiy zapovednik: populjarniy ocherk* [Central forest state natural biosphere reserve: popular overview]. Moscow, Delovoy Mir Publ., 80 p.

-
- Amiro B.D. 2001. Paired-tower measurements of carbon and energy fluxes following disturbance in the boreal forest. – *Global Change Biology*, vol. 7, pp. 253-268.
- Amiro B.D., Barr A.G., Black T.A., Iwashita H., Kljun N., McCaughey J.H., Morgenstern K., Murayama S., Nesic Z., Orchansky A.L., Saigusa N. 2006. Carbon, energy and water fluxes at mature and disturbed forest sites, Saskatchewan, Canada. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 136, pp. 237-251.
- 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., Randerson J.T., Starr G., Xiao J. 2010. Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America. – *J. Geophysical Research*, vol. 115, G00K02.
- Aubinet M., Vesala T., Papale D. 2012. *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*. – Springer Atmospheric Sciences, Dordrecht, The Netherlands: Springer Verlag, 438 p.
- Carlson D.W., Groot A. 1997. Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 87, pp. 313-329.
- 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., Guomundsson J., Hollinger D., Kowalski A.S., Katul G., Law B.E., Malhi Y., Meyers T., Monson R.K., Munger J.W., Oechel W., Paw U K.T., Pilegaard K., Rannik U., Rebmann C., Suyker A., Valentini R., Wilson K., Wofsy S. 2002. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 113, pp. 53-74.
- Foken T., Göckede M., Mauder M., Mahrt L., Amiro B.D., Munger J.W. 2004. Post-field data quality control. – In: Lee X., Massman W.J., Law B. (eds.). *Handbook of micrometeorology: a guide for surface flux measurement and analysis*. – Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, pp. 81-108.
- Giasson M.-A., Coursolle C., Margolis H.A. 2006. Ecosystem-level CO₂ fluxes from a boreal cutover in eastern Canada before and after scarification. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 140 (1-4), pp. 23-40.
- IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013, 1535 p.
- Keenan R.J., Kimmins J.P. 1993. The ecological effects of clear-cutting. – *Environmental Reviews*, vol. 1, pp. 121-144.
- Kljun N., Calanca P., Rotach M.W., Schmid H.P. 2004. A simple parameterisation for flux footprint predictions. – *Boundary Layer Meteorology*, vol. 112, pp. 503-523.
- Kowalski S., Sartore M., Burrett R., Berbigier P., Lostau D. 2003. The annual carbon budget of a French pine forest (*Pinus pinaster*) following harvest. – *Global Change Biology*, vol. 9, pp. 1051-1065.
- Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Mukhartova Yu, Krupenko A., Ivanov D., Levashova N., Olchev A. 2016. Changes in net ecosystem exchange of CO₂, latent and sensible heat fluxes in a recently clear-cut spruce forest in western Russia: results from an experimental and modeling analysis. – *Environmental Research Letters*, vol. 11(12), 125012.
-

McCaughey J.H. 1987. The albedo of a mature mixed forest and a clear-cut site at Petawawa, Ontario. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 40(3), pp. 251-263.

Migliavacca M., Meroni M., Manca G., Matteucci G., Montagnani L., Grassi G., Zenone T., Teobaldelli M., Goded I., Colombo R., Seufert G. 2009. Seasonal and interannual patterns of carbon and water fluxes of a poplar plantation under peculiar eco-climatic conditions. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 149(9), pp. 1460-1476.

Oltchev A., Cermak J., Gurtz J., Kiely G., Nadezhdina N., Tishenko A., Zappa M., Lebedeva N., Vitvar T., Albertson J.D., Tatarinov F., Tishenko D., Nadezhdin V., Kozlov B., Ibrom A., Vygodskaya N., Gravenhorst G. 2002. The response of the water fluxes of the boreal forest region at the Volga's source area to climatic and land-use changes. – *J. Physics and Chemistry Earth*, vol. 27 (9-10), pp. 675-690.

Papale D., Reichstein M., Aubinet M., Canfora E., Bernhofer C., Kutsch W., Longdoz B., Rambal S., Valentini R., Vesala T., Yakir D. 2006. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. – *Biogeosciences*, vol. 3, pp. 571-583.

Radler K., Oltchev A., Panferov O., Klinck U., Gravenhorst G. 2010. Radiation and temperature responses to a small clear-cut in a spruce forest. – *Open Geography Journal*, vol. 3, pp. 103-114.

Reichstein M., Falge E., Baldocchi D., Papale D., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Gilmanov T., Granier A., Grünwald T., Havránková 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. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. – *Global Change Biology*, vol. 11, pp. 1424-1439.

Rodrigues A., Pita G., Mateus J., Kurz-Besson C., Casquilho M., Cerasoli S., Gomes A., Pereira J. 2011. Eight years of continuous carbon fluxes measurements in a Portuguese eucalypt stand under two main events: Drought and felling. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 151(4), pp. 493-507.

Williams C.A., Vanderhoof M.K., Khomik M., Ghimire B. 2014. Post-clearcut dynamics of carbon, water and energy exchanges in midlatitude temperate, deciduous broadleaf forest environment. – *Global Change Biology*, vol. 20(3), pp. 992-1007.

Wilson K., Goldstein A., Falge E., Aubinet M., Baldocchi D., Berbigier P., Bernhofer C., Ceulemans R., Dolman H., Field C., Grelle A., Ibrom A., Law B.E., Kowalski A., Meyers T., Moncrieff J., Monson R., Oechel W., Tenhunen J., Valentini R., Verma S. 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 113(1-4), pp. 223-243.

Статья поступила в редакцию: 13.04.2017

После переработки: 16.05.2017