

МОНИТОРИНГ ЦИКЛОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И ВОДЯНОГО ПАРА НА ПОЛИГОНЕ «ЛОГ ТАЕЖНЫЙ» (ВАЛДАЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПАРК)

Д.Г. Замолодчиков^{1)*, 2), 3)}, *М.Л. Гитарский*³⁾, *А.В. Шилкин*⁴⁾,
*А.С. Марунич*⁵⁾, *Д.В. Карелин*^{1), 2), 3), 7)}, *В.Г. Блинов*⁶⁾, *А.И. Иващенко*¹⁾

¹⁾ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, Биологический факультет;
dzamolod@mail.ru

²⁾ Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, стр. 14

³⁾ Институт глобального климата и экологии Росгидромета-РАН
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

⁴⁾ НПО «Тайфун» Росгидромета,
Россия, 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4

⁵⁾ Валдайский филиал Государственного гидрологического института Росгидромета,
Россия, 175400, г. Валдай, Новгородская обл., ул. Победы, д. 2

⁶⁾ Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»,
Россия, 123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., д. 7

⁷⁾ Институт географии РАН,
Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29

Резюме. Полигон «лог Таежный» имеет 75-летнюю историю гидрологических и экологических исследований. С конца 2000-х годов на полигоне проводятся интенсивные исследования и мониторинг потоков парниковых газов с использованием методов микродинамических пульсаций и закрытых камер. Пульсационные измерения стартовали в мае 2010 г. и были прекращены по техническим причинам в августе 2011 г. Для этого периода были получены оценки испарения и обменного потока CO₂. За календарный год (16 августа 2010 г. – 15 августа 2011 г.) суммарное испарение составило 324 мм (41% годовой суммы осадков). Южно-таежный ельник в целом является стоком атмосферного углерода, нетто-поглощение составляет около 300 г С м⁻² год⁻¹. Однако в период аномальной жары летом 2010 г. экосистема была источником диоксида углерода. Среднесуточная пороговая температура смены знака углеродного баланса составила 28°C.

Ключевые слова. Лесная экосистема, мониторинг, диоксид углерода, водяной пар, осадки, испарение, изменения климата.

MONITORING OF CARBON DIOXIDE AND WATER VAPOR CYCLES AT THE “LOG TAYOZHNY” EXPERIMENTAL SITE (NATIONAL PARK “VALDAYSKY”)

D. G. Zamolodchikov^{1)*, 2), 3)}, *M. L. Gytarsky*³⁾, *A. V. Shilkin*⁴⁾, *A. S. Marunich*⁵⁾,
D. V. Karelin^{1), 2), 3), 7)}, *V. G. Blinov*⁶⁾, *A. I. Ivaschenko*¹⁾

¹⁾ Lomonosov Moscow State University,
Biological Department, 1, build. 12, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russia;
dzamolod@mail.ru

²⁾ Forest Ecology and Production Center of RAS,
84/32, build. 14, Profsoyusnaya str., 117997 Moscow, Russia

³⁾ Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS,
20B, Glebovskaya street, 20B, Moscow, 107258, Russia

⁴⁾ SPA “Typhoon” of Roshydromet,
4, Pobedy street, Obninsk, Kaluzhskaya region, 249038, Russia

⁵⁾ Valdaysky Branch of State Hydrological Institute of Roshydromet,
2, Pobedy street, Valday, Novgorodskaya region, 175400, Russia

⁶⁾ “Planeta” Scientific and Research Center for Space Hydrometeorology
7, Great Predtechensky lane, Moscow, 123242, Russia

⁷⁾ Institute of Geography of RAS, 29, Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russia

Summary. The “Log Tayozhny” experimental site accounts for 75-year history of hydrologic and environmental studies. Intensive research and monitoring of greenhouse gas fluxes have been initiated at the site at the end of 2000s with the use of eddy covariance and closed chamber techniques. The eddy covariance measurements started in May 2010 and were terminated for technical reasons in August 2011. The evaporation and CO₂ flux exchange were measured over this period. For the calendar year (August 16, 2010 to August 15, 2011), the total evaporation was 324 mm, which comprises 41% of annual precipitation. The southern taiga spruce forest is a sink of atmospheric carbon with net-absorption of about 300 g C m⁻² yr⁻¹. However, in 2010, during the abnormally hot summer period, the ecosystem became the source of carbon dioxide. Average threshold temperature for such a switch of carbon balance sign is 28°C.

Keywords. Forest ecosystem, monitoring, carbon dioxide, water vapor, precipitation, evaporation, climate change.

Введение

За период 1880-2012 гг. средняя глобальная температура увеличилась примерно на 0.85°C (Изменение климата, 2013). В масштабах планеты это значительная величина, приводящая к еще более выраженным изменениям региональных климатов. В частности, средняя температура приземного воздуха на территории России за то же время возросла почти на 2°C (Второй оценочный доклад..., 2013). Одной из главных причин современного глобального потепления признан рост антропогенных выбросов парниковых газов, в первую очередь диоксида углерода. При этом от глобальных антропогенных выбросов CO₂, ныне составляющих около 9.0 Гт С в год, в атмосфере остается меньше половины (4.4 Гт С), в то время как 2.6 Гт С растворяются в океане, а 2.0 Гт С поглощаются на суше (Global carbon project, 2015). Приблизительные соотношения 50 на 50, характерные как для остающейся в атмосфере и поглощаемой биосферой частей антропогенного выброса диоксида углерода, так и разделения его поглощения сушей и океаном сохраня-

ются на протяжении индустриального периода. Иначе говоря, поглотительная способность океана и суши возрастают пропорционально величине антропогенного выброса CO_2 .

Причины роста поглотительной способности океана имеют в первую очередь физико-химическую природу и связаны с растворением CO_2 в недонасыщенной по сравнению с атмосферой морской воде. Усиление поглощения углерода на суше чаще всего объясняют активизацией продукционных процессов в растительном покрове, связанной с фертилизацией растущими концентрациями атмосферного CO_2 , усилением выпадений оксидов азота с осадками и прямым воздействием потепления. Встречаются точки зрения, оспаривающие роль перечисленных механизмов и выражающие сомнение в том, что наземные экосистемы и в будущем останутся значимым стоком диоксида углерода (Sitch et al., 2015 и др.). Тем не менее, обязательства стран принимать во внимание наилучшие имеющиеся научные знания о фактической емкости поглотителей при оценке национальных уровней выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов закреплены в статье 4 Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН). При этом и Конвенция, и принятое на 21 Конференции Сторон РКИК ООН в 2015 г. Парижское соглашение, подчеркивают необходимость обеспечения экологической целостности, прозрачности, точности, полноты, сопоставимости и согласованности учета антропогенных выбросов и абсорбции парниковых газов на национальном уровне.

В то же время следствием неоднозначности научных суждений о динамике выбросов и поглощений парниковых газов в лесных и других естественных экосистемах является высокая неопределенность количественных оценок поглощений в национальных кадастрах парниковых газов, представляемых в органы РКИК ООН. Поэтому развитие экспериментальных и теоретических исследований по уточнению углеродного цикла естественных экосистем является актуальной задачей. И здесь исключительно велика роль долговременных стационарных наблюдений, которые обеспечивают возможность выявления долгосрочных трендов в функционировании экосистем и их возможные зависимости от изменений внешней среды и климата.

Одним из наиболее долгосрочных пунктов стационарных наблюдений за функционированием лесных экосистем в нашей стране является полигон «лог Таежный» Валдайского филиала Государственного гидрологического института (ВФ ГГИ), расположенный на территории Национального парка «Валдайский». Наблюдения за поверхностным стоком здесь были начаты в 1939 г. (Молчанов, 1973), прерваны войной и возобновлены с начала 1950-х годов. В 1970-е на полигоне проводились детальные исследования всех компонентов водного баланса (Федоров, 1977), а также многих других структурных и функциональных характеристик лесной экосистемы, в частности, первичной продукции (Ватковский и др., 1972, 1974), дыхания почвы (Гришина и др., 1979), биомассы почвенных беспозвоночных (Гришина, Коротков, 1976), опада и подстилки (Гришина, Владыченский, 1979). С начала 2010-х годов, при поддержке Росгидромета, на полигоне были начаты интенсивные

исследования и мониторинг потоков парниковых газов с использованием методов микродинамических пульсаций и закрытых камер. К настоящему времени опубликованы некоторые результаты этих работ, в частности, по оценке эмиссий CO_2 от почвы (Карелин и др., 2014) и валежной древесины (Сафонов и др., 2012), а также поглощения этого газа при фотосинтезе ели (Юзбеков и др., 2014). Цель настоящей работы состоит в изложении современных оценок испарения и экосистемного обмена CO_2 на полигоне «лог Таежный».

Методы и материалы

Полевые работы проводились на исследовательском полигоне «лог Таежный» Валдайского филиала ГГИ. Полигон расположен на территории Валдайского р-на Новгородской обл. Основной массив полевых данных по дыханию почвы был получен в 110-летнем ельнике мелкотравно-зеленомошном ($57^{\circ}57.76'$ с. ш., $33^{\circ}20.34'$ в. д., 218 м над у. м.). Согласно лесотаксационным работам, проведенным в 2010 г., древостой имеет формулу 9Е1С, средний диаметр равен 37 см; средняя высота 31 м, полнота 0.6, бонитет 1. Объемный запас стволовой древесины составляет $479 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$, сухостоя $109 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$, валежа $70 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$.

Регистрацию компонентов углеродного и водного баланса проводили методом микродинамических пульсаций (eddy covariance). Основные компоненты установки представлены регистратором CR500 (Campbell Scientific Inc., USA), акустическим анемометром CSAT-3 (Campbell Scientific Inc., USA) и инфракрасным $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ анализатором открытого типа LI-7500 (LI-COR Inc., USA). Ключевой набор сенсоров был размещен на высотной мачте на высоте 37 м при высоте окружающего древостоя 32 м (рис. 1). Дополнительный набор сенсоров включал регистраторы радиационного баланса, фотосинтетически активной радиации (ФАР), осадков, влажности воздуха, температуры воздуха и почвы на различных уровнях, потоков почвенного тепла, влажности почвы.

Эксплуатация установки осуществлялась Валдайским филиалом ГГИ совместно с НПО «Тайфун» в период с 15 мая 2010 по 18 августа 2011 г. Контроль работы установки одновременно с предварительным расчетом потоков энергии, CO_2 и H_2O проводился при помощи программного обеспечения, предоставленного Campbell Scientific Inc. Поскольку в установке был использован анализатор открытого типа LI-7500, программное обеспечение при расчете потоков включало применение поправок частотных характеристик и на флуктуации плотности воздуха (Бурба и др., 2016). Результаты были представлены значениями балансового потока CO_2 между экосистемой и атмосферой, также называемого чистым экосистемным обменом (*NEE*), испарения (эвапотранспирации), турбулентного потока тепла, затрат тепла на испарение для 30-минутных интервалов всего периода измерений, а также величинами температур и прочих параметров, усредненных на тех же 30-минутных интервалах



Рисунок 1. Акустический анемометр CSAT-3 и инфракрасный CO₂-H₂O анализатор LI-7500 на высотной мачте над пологом южно-таежного ельника

Окончательную обработку данных, полученных на пульсационной установке, проводили в пакете Microsoft Excel. Она состояла в фильтрации исходных массивов от выпадающих значений, заполнении пропусков данных, расчете суточных и сезонных сумм. Выпадающие значения регистрируются установкой при метеорологических явлениях, нарушающих свободный ход луча инфракрасного анализатора в колонне воздуха, например, при тумане или снегопаде. Формальными критериями для исключения выпадающих значений служили расхождение сумм разнонаправленных потоков энергии (подробнее критерий сходимости энергии охарактеризован в руководстве Бурба и др., 2016) более чем на 100 Вт м^{-2} , либо отличие NEE от среднего за декаду месяца для данного временного срока более чем на $0.01 \text{ ммоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Из общего числа 30-минутных интервалов, равного 17114, 4.2% пришлось на пропуски по техническим причинам (обслуживание установки, перерывы энергоснабжения), 8.4% на значения, исключенные по критерию сходимости энергии, 9.7% - исключенные по причине выпадающих значений NEE . В расчете на сутки, средняя доля пропущенных и исключенных значений составила 22.3%, что примерно соответствует 11 исключенным и 37 принятым значениям за сутки. Заполнение пропущенных и исключенных значений проводили по среднему из принятых за 10 дней значений для данного 30-минутного интервала. Например, исключенное значение для интервала 10:00-10:30 от 22 июня заполнялось средним по принятым значениям интервала 10:00-10:30 периода 21-30 июня. При дальнейшем расчете суммарных суточных (NEE , испарение, осадки) и среднесуточных (температура, влажность, ФАР, потоки энергии) величин принятые и заполненные значения рассматривались как единый массив.

Характеристика межгодовой изменчивости погодных условий в сравнении с климатическими нормами осуществлена по данным метеостанции «Валдай», хранящимся в архиве ВФ ГГИ.

Результаты и дискуссия

Особенности погодных условий периода наблюдений. Среднегодовые температуры в районе исследований в 2009-2015 гг. варьировали от 4.2 до 6.2°C (рис. 2), что на 0.5-2.5°C выше климатической нормы 1961-1990 г. Максимальная среднемесячная температура (+24.1°C) отмечена в июле 2010 г. Причиной тому был блокирующий антициклон, который установился на территории Европейской части России летом 2010 г. и привел к аномально высоким температурам. Но в целом 2010 г. оказался достаточно холодным для 7-летнего периода наблюдений, что связано с низкими зимними температурами. Можно отметить тренд к повышению температуры за 2009-2015 г., но он не является статистически значимым ($P=0.14$).

По годовому количеству осадков, варьировавшему от 639 (2015 г.) до 914.8 (2009 г.) мм, период 2009-2015 гг. несколько превышает климатическую норму 1961-1990 гг. (700.8 мм). Наименьшее количество осадков (6 мм) отмечено в июле 2010 г. Впрочем, большое количество осадков, выпавших в конце августа 2010 г. (189 мм), компенсировало июльский минимум в годовой сумме. Минимальным по сумме осадков был 2014 г. (639 мм). Тренд к уменьшению осадков в 2009-2015 гг. статистически значим ($P=0.01$).

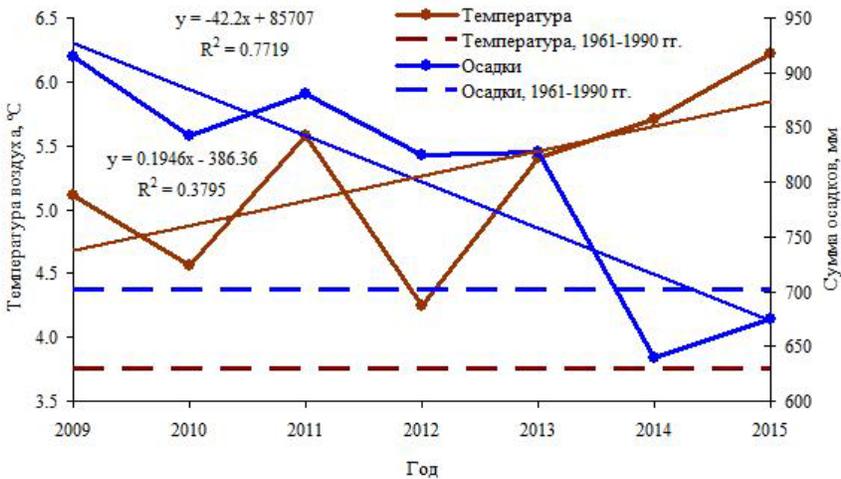


Рисунок 2. Современная динамика среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков по данным метеостанции «Валдай» в сравнении с климатическими нормами 1961-1990 гг.

Осадки и испарение. Период работы установки Campbell, регистрирующей газы и широкий комплекс других метеорологических характеристик, включал лето 2010 г., часть которого в Европейской части России отличалась необычно высокой температурой и отсутствием осадков. На Валдае такие условия умеренно сказались на испарении, которое уменьшилось всего на 30% в сравнении с типичными условиями (рис. 3А). Поддержание уровня испарения шло за счет уменьшения влагозапаса почвы, что ярко выразилось в уменьшении влажности верхнего слоя почвы (рис. 3Б)

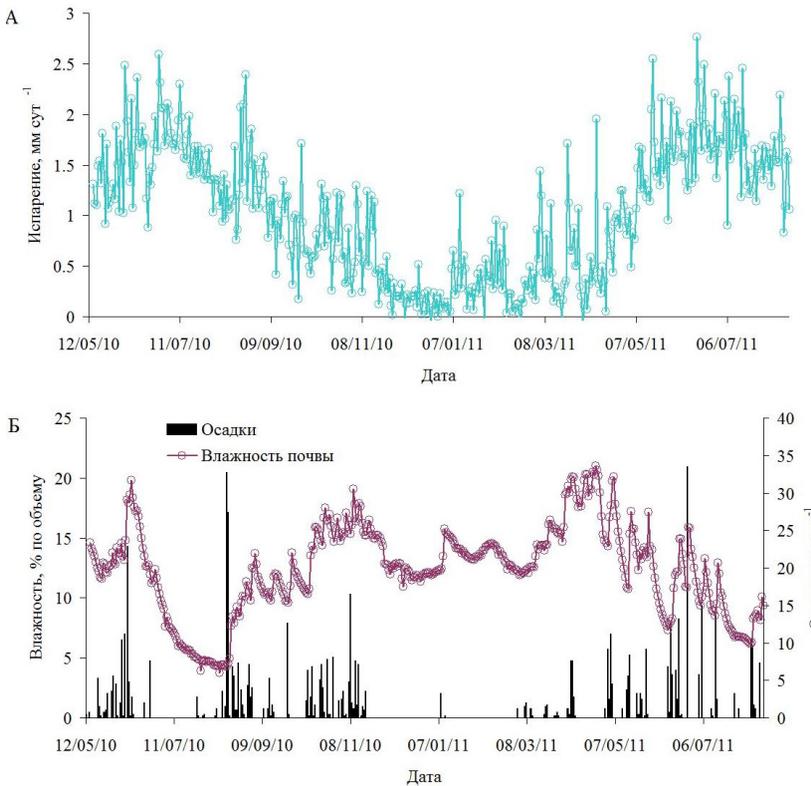


Рисунок 3. Динамика испарения (А), осадков и влажности почвы (Б) за май 2010 г. – сентябрь 2011 г. в южнотаежном ельнике.

Испарение и осадки представлены суточными суммами по 48-и 30-минутным интервалам, влажность – суточными средними по 48-и 30-минутным интервалам

Суммарные осадки в период с 15 мая по 30 сентября 2010 г. составили 233 мм, а испарение – 197 мм, то есть 85% от осадков. В монографии (Федоров, 1977) для того же самого полигона «лог Таежный» приводится оценка осадков за май-сентябрь 1950-1964 гг., равная 448 мм, а также ежегодные значения испарения за май-сентябрь с 1955 по 1973 гг., варьирующие от 367 (1970 г.) до 448 (1957 г.) мм при среднем значении 406 мм. Соотношение между испарением и осадками в этом случае составляет 90%. Отметим заметное различие в цитируемых и наших оценках испарения, что связано как со спецификой сухого 2010 г., так и различием в методических подходах к оценке испарения. В работе (Кучмент и др., 2012) проведен перерасчет испарения по полигону «лог Таежный» для 1971-1973 гг. на основе оригинальной модели гидрологического цикла лесного водосбора. Согласно этой работе, для периода 24 мая – 15 сентября 1971 г. осадки и испарение составляли 340 и 268 (79%), 1972 г. – 118 и 238 (202%), 1973 г. – 316 и 225 мм (71%), что ближе к полученным нами оценкам в сравнении с данными из источника (Федоров, 1977). Напомним, что лето 1972 г. на территории Европейской части России отличалось необычной жарой и сухостью. Приведенные данные свидетельствуют, что по соотноше-

нию компонентов гидрологического цикла в лесах Валдая оно было даже более экстремальным, чем лето 2010 г.

По сравнению с теплым, в холодный период года испарение существенно уменьшилось, составив в сумме за 3 зимних месяца 23 мм (0.3 мм за сутки). Осадки в форме снега не регистрируются установкой Campbell, согласно же данным метеостанции Валдай, за зиму 2010-2011 гг. сумма осадков составила 194 мм. Таким образом, за зиму испаряется примерно 12% выпавших осадков. Устойчиво высокие величины объемной влажности почвы, составившие в среднем 18.5%, были зарегистрированы в апреле 2011 г. (рис. 3А). Они вполне логично объясняются влагозапасом, образовавшимся при таянии снежного покрова.

Измерения в теплые периоды 2010 и 2011 гг. в сезонном аспекте пересекались для интервала 15 мая – 15 августа. Осадки в этот интервал составили 101 и 194 мм соответственно, а испарение – 143 и 154 мм соответственно. Эти величины являются очередным подтверждением стабилизирующего воздействия лесной экосистемы по отношению к гидрологическому циклу: при различии осадков на 90% разница между значениями испарения составляет всего 8%.

За период, равный календарному году (16 августа 2010 г. – 15 августа 2011 г.), суммарные осадки составили 793 мм. Эта величина составлена из двух компонентов: 1) осадков согласно установке Campbell для августа-октября 2010 г. и апреля-августа 2011 г.; 2) осадков согласно метеостанции Валдай с ноября 2010 г. по март 2011 г. Суммарное годовое испарение оценивается 324 мм, то есть в 41% от осадков. Доля испарения в зимний период (декабрь 2010 г. – февраль 2011 г.) от годового составила 7.3%.

NEE лесной экосистемы. Сезонный характер динамики *NEE* в южно-таежном ельнике (рис. 4) вполне соответствует найденному во многих других работах, выполненных с использованием метода турбулентных пульсаций (Загирова, Михайлов, 2016; Чебакова и др., 2014; Kurbatova et al., 2008 и др.): в безморозное время года (апрель-октябрь) преобладает сток углерода из атмосферы в лесную экосистему, в холодное (ноябрь-март) – источник. На рис. 4 и далее для обозначения стока углерода из атмосферы используются отрицательные значения. Среднесуточное значение *NEE* для безморозного периода составило $-1.82 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, в то время как для холодного периода оно равнялось $0.26 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$. Эти изменения вполне логично объясняются сезонными экофизиологическими реакциями лесной растительности и организмов деструкторов. Разложение мертвого органического вещества грибами и бактериями происходит в течение всего года, в то время как фотосинтез растений, формирующий валовую первичную продукцию (*GPP*) – лишь в течение безморозного периода. В исследуемом ельнике *GPP* превышает по абсолютной величине совокупность автотрофного и гетеротрофного дыхания, потому в безморозное время имеет место сток углерода. В холодное время действует лишь эмиссионная компонента потока CO_2 , определяемая дыханием.

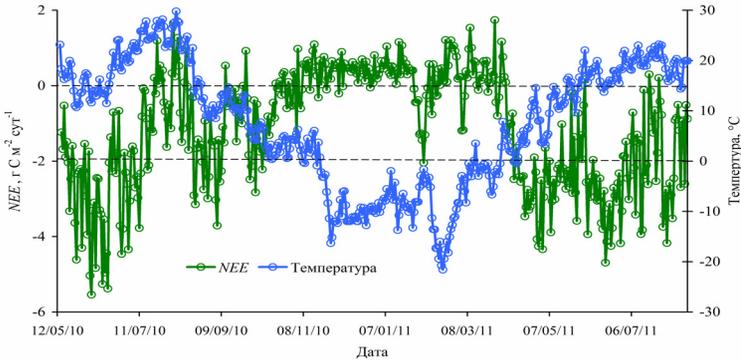


Рисунок 4. Динамика *NEE* и температуры воздуха за май 2010 г. – сентябрь 2011 г. в южно-таежном ельнике.

NEE представлен суточными суммами по 48 30-минутным интервалам, температура – суточными средними по 48 30-минутным интервалам

Сезонная изменчивость *NEE* приводит к очевидной связи с температурой: в холодное время года поток направлен в атмосферу, а в теплое – в экосистему. Коэффициент корреляции между *NEE* и среднесуточной температурой воздуха равен -0.504 ($N=460$, $P < 0.001$). Знак «минус» при коэффициенте корреляции объясняется выбором отрицательной области для отображения стока углерода, имеющего место в области положительных температур.

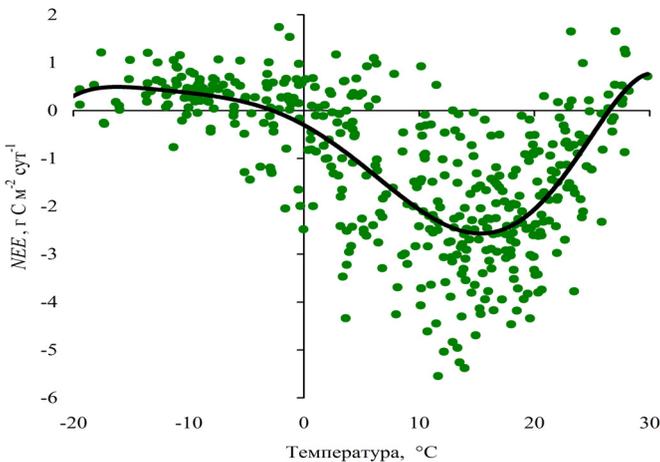


Рисунок 5. Зависимость *NEE* от температуры воздуха в южно-таежном ельнике.

NEE представлен суточными суммами по 48 30-минутным интервалам, температура – суточными средними по 48 30-минутным интервалам

Хотя отрицательная линейная связь между температурой и *NEE* статистически значима, на рис. 4 имеются области с ее очевидным нарушением. В частности, такое нарушение присутствует для июля-августа 2010 г., то есть отмеченного ранее периода аномальной жары в центральной части Европейской России. Сред-

несуточные температуры в этот временной интервал достигали максимальных значений 27-28°C, но *NEE* имело положительные значения, то есть лесная экосистема была источником углерода для атмосферы. Данный пример, а также аналогичные кратковременные ситуации в начале июня и середине июля 2011 г., приводят к заключению, что связь между температурой и *NEE* не является линейной. Это заключение подтверждается рис. 5, представляющим данные измерений в системе координат “температура – *NEE*”. Можно отметить, что существует интервал температур 10-20°C, обеспечивающий максимальный сток углерода в экосистему, и два пороговых значения, при котором происходит смена знака углеродного баланса. Первое значение является порогом для перехода от источника к стоку и равно примерно -3°C, второе – от стока к источнику в области 27°C.

Формирование зависимости, близкой к представленной на рис. 5, можно объяснить с учетом того, что *NEE* является суммой разнонаправленных потоков (1):

$$NEE = GPP + ER \quad (1)$$

где *GPP* – валовая первичная продукция, *ER* – суммарное дыхание экосистемы. *ER*, как правило, экспоненциально зависит от температуры, в то время как *GPP* имеет функциональную зависимость с одним оптимумом. Тогда балансовый поток *NEE* также должен обладать оптимумом в области стока CO₂, причем в интервале меньших температур по сравнению с *GPP*, а также двумя пороговыми значениями температуры для смены знака баланса – в области нулевых и в области повышенных значений температуры. Именно такой вид имеет линия тренда на рис. 5. Однако разброс экспериментально-полевых значений вокруг линии тренда достаточно высок. Здесь сказывается действие прочих экологических факторов, влияющих на углеродные потоки, фенологическое состояние растительности, и также неопределенности оценок, формируемых пульсационной установкой.

Ранее нами было найдено верхнее пороговое значение температуры для углеродного баланса южных тундр, равное 14°C (Замолодчиков и др., 1998; Zamolodchikov et al., 2000; Карелин, Замолодчиков, 2008), что примерно в 2 раза меньше, чем 27°C, установленное в качестве порога для южно-таежного ельника. Цитируемая работа была выполнена методом светлых и темных камер, позволявшим получить прямые оценки *NEE*, *ER* и *GPP*. Смена знака баланса была вызвана существенным ростом *ER* на фоне относительной стабильности *GPP*.

Собранная на пульсационной установке информация позволяет оценить связь *NEE* с влажностью почвы, которая может влиять как на фотосинтез растений, так и деструкционные процессы в почве. Анализ всего массива суточных величин не выявил достоверной связи *NEE* и влажности почвы ($R=-0.012$, $N=460$, $P = 0.793$). Однако в летние месяцы 2010 г. такая связь была значима, поскольку влажность контролировала *NEE* при низких, «лимитирующих» значениях, что случается нерегулярно при наличии экстремальных засух. При типичных погодных условиях значения влажности находятся в зоне оптимума для стока углерода (в летнее время) либо его источника (в зимнее время),

потому на всем рассмотренном интервале (май 2010 г. – август 2011 г.) значимых связей с *NEE* не просматривается.

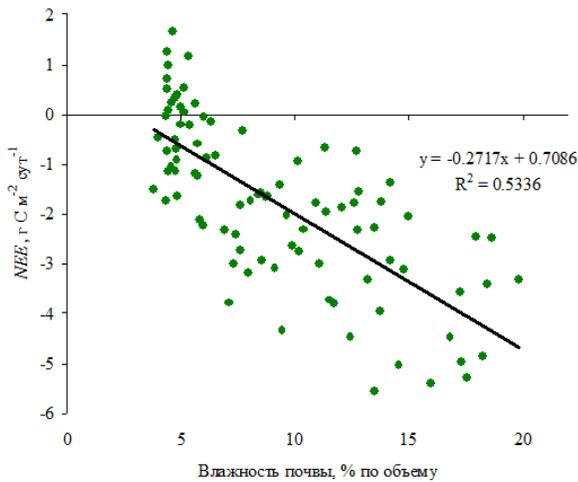


Рисунок 6. Зависимость *NEE* от влажности почвы в южно-таежном ельнике для летних месяцев 2010 г.

NEE представлен суточными суммами по 48-и 30-минутным интервалам, влажность – суточными средними по 48 30-минутным интервалам

Для временных интервалов, равных одному году, суммарный *NEE* составил -317 (15.05.2010-14.05.2011) и -346 (15.08.2010-14.08.2011) г С м⁻² год⁻¹. Эти величины свидетельствуют, что исследуемый южно-таежный ельник был заметным стоком углерода из атмосферы. К аналогичному заключению, как правило, приводят и известные из литературы многочисленные оценки годового стока углерода в лесные экосистемы из различных регионов, выполненные пульсационным методом. Так, сток атмосферного углерода в старовозрастном среднетаежном ельнике Республики Коми составил -219 г С м⁻² год⁻¹ (Загирова, Михайлов, 2016), в среднетаежном сосновом лесу Западно-Сибирской низменности -156 г С м⁻² год⁻¹ (Чебакова и др., 2014), в 180-летнем лиственничнике Центральной Якутии -230 г С м⁻² год⁻¹ (Kotani et al., 2014). В получившей широкую известность обзорной работе (Lyussaert et al., 2008) отмечается, что сток углерода в лесах с возрастом выше 200 лет в среднем близок к -240±80 г С м⁻² год⁻¹.

Некоторые другие соображения приводят к сомнениям в достаточной адекватности найденной в нашем исследовании величины *NEE*. Исследуемый объект представляет собой спелый одновозрастный ельник с высоким запасом древесины. Именно такие ельники с конца 1990-х годов были охвачены волной массовых усыханий (Жигунов и др., 2007; Allen et al., 2011 и др.). Усыхание части древостоя отмечено и на полигоне «лог Таежный». Так, запас живой части древостоя с 2009 г. по 2011 г. уменьшился с 571 до 352 м³ га⁻¹, в то время как запас сухостойной части увеличился с 31 до 208 м³ га⁻¹ (Сафонов и др., 2012). Не вполне понятно, как лес может оставаться мощным стоком углерода на фоне потери примерно 40% живых деревьев.

Вторая часть соображений связана с необходимостью введения различных поправок к величинам потоков при использовании в пульсационных установках анализаторов открытого типа. Процедура первичной обработки, реализованная в программном обеспечении Campbell, предусматривала стандартное введение поправки частотных характеристик и поправки на флуктуации плотности воздуха (подробнее см. в Бурба и др., 2016). Однако к использованному комплекту оборудования вполне может быть применима поправка на нагрев поверхности прибора (Burba et al., 2006). Отсутствие этой поправки на фоне пониженных температур воздуха может приводить к заметной переоценке стока CO_2 . Применение указанной поправки ко всему массиву данных привело к существенной модификации годовых оценок: суммарный *NEE* составил 110 (15.05.2010-14.05.2011) и 74 (15.08.2010-14.08.2011) г С м⁻² год⁻¹. То есть, заключение о характере углеродного баланса исследуемого ельника изменилось на противоположное – экосистема представляет собой заметный источник углерода для атмосферы. Добавим, что наиболее близкий по географическому положению ельник чернично-сфагновый Центрального лесного государственного заповедника (Тверская область), в котором проводится длительный мониторинг пульсационным методом, является устойчивым источником углерода для атмосферы в диапазоне 150-277 г С м⁻² год⁻¹ (Ольчев и др., 2009; Kurbatova et al., 2013). Функционирование лесной экосистемы как источника углерода для атмосферы не является исключительным случаем, хотя такие примеры и встречаются в литературе по пульсационному методу намного реже, чем регистрации стока углерода.

Изменение годовой оценки *NEE* исследуемого ельника при применении дополнительной поправки приводит к заключению, что пульсационный метод до сих пор следует считать поисковым, то есть лишь приближающимся к получению адекватных оценок углеродного баланса на интервалах лет и десятилетий. Методы контроля качества измерений и многочисленные поправки, которые могут быть применены при расчетах потоков, детально рассмотрены в руководстве (Бурба и др., 2016). Ныне приобретают популярность исследования методического плана, в частности, синхронного применения анализаторов открытого и закрытого типа на пульсационных установках. Авторы настоящей работы предпринимают усилия по организации контрольных пульсационных измерений в исследуемом ельнике с применением обоих типов анализаторов, что позволит высказать более надежные суждения о годовом характере углеродного баланса.

Заключение

Полигон «лог Таежный», представляющий южно-таежные ельники, обладает 75-летней историей гидрологических и экологических наблюдений. Возможности анализа рядов данных по этому стационару в целях понимания эффектов изменения климата далеко не исчерпаны. В этой связи представляется целесообразным продолжение мониторинга массо- и энергообмена на полигоне с применением современных инструментальных методов, в частно-

сти, пульсационного подхода. Вместе с тем, необходимо обращать детальное внимание на корректность сопоставимости ретроспективных и современных результатов, поскольку инструментальные подходы прошлого и современности обладают различными наборами систематических погрешностей.

Благодарности

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской тематики Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации и при поддержке РФФ 16-17-00123 «Научные основы учета и прогноза бюджета углерода лесов России в системе международных обязательств по охране атмосферы и климата». Статья посвящена памяти Ф.В. Кашина (НПО «Тайфун»), внесшего неоценимый вклад в постановку инструментального мониторинга парниковых газов. Авторы благодарны О.В. Честных и А.В. Почикалову (МГУ имени М.В. Ломоносова), В.В. Каганову (ЦЭПЛ РАН), В.Н. Короткову, В.А. Грабар и Н.Е. Уваровой (ИГКЭ Росгидромета и РАН) за помощь в осуществлении полевых работ.

Список литературы

Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Мамкин В.В. 2016. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. – М., ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 223 с.

Ватковский О.С., Гришина Л.А., Лидов В.П., Бабьева И.П. 1972. Почвы и продуктивность ельников Валдая. – В кн.: Почвы и продуктивность растительных сообществ, вып. 1. – М., Изд-во МГУ, с. 131-149.

Ватковский О.С., Головенко С.В., Гришина Л.А., Кузнецов Г.В., Лазукова Г.Г., Тительман И.З., Федоров С.Ф. 1974. Экология и продуктивность геохимически автономных ельников Валдая. – В кн.: Почвы и продуктивность растительных сообществ, вып. 2. – М., Изд-во МГУ, с. 89-141.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2013. – М., Росгидромет, 1009 с.

Гришина Л.А., Владыченский А.С. 1979. Опад и подстилка хвойных лесов Валдая. – В кн.: Почвы и продуктивность растительных сообществ, вып. 4. – М., Изд-во МГУ, с. 51-62.

Гришина Л.А., Коротков К.О. 1976. Структура населения и биомасса крупных почвенных беспозвоночных ельников и сосняков Валдая. – В кн.: Почвы и продуктивность растительных сообществ, вып. 3. – М., Изд-во МГУ, с. 89-141.

Гришина Л.А., Окунева Р.М., Владыченский А.С. 1979. Микроклимат и дыхание дерново-скрытоподзолистых почв ельников-кисличников. – В кн.: Организация экосистем ельников южной тайги. – М., Ин-т географии АН СССР, с. 114-139.

Жигунов А.В., Семакова Т.А., Шабунин Д.А. 2007. Массовое усыхание лесов на Северо-Западе России. – Лесобиологические исследования на Северо-Западе таежной зоны России: итоги и перспективы. Материалы научной конференции, посвященной 50-летию Института леса Карельского научного центра РАН (3-5 октября). – Петрозаводск, КарНЦ РАН, с. 42-52.

Загирова С.В., Михайлов О.А. 2016. Биогенные потоки диоксида углерода в старовозрастном ельнике средней тайги по результатам измерений методом микровихревых пульсаций – Лесоведение, № 3, с. 163-174.

Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Иващенко А.И. 1998. Пороговая температура углеродного баланса южных тундр – Доклады Академии наук, т. 358, № 5, с. 708-709.

Изменение климата. 2013. – Физическая научная основа. Резюме для политиков. Техническое резюме и Часто задаваемые вопросы. – Кембридж, Кембридж юниверсити пресс, 222 с.

Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г. 2008. Углеродный обмен в криогенных экосистемах – М., Наука, 344 с.

Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолодчиков Д.Г., Гитарский М.Л. 2014. Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ из почв южно-таежного ельника на Валдае – Лесоведение, № 4, с. 56-66.

Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н. 2012. Модель гидрологического цикла лесного водосбора и оценка изменений водного баланса при вырубке леса – Лесоведение, № 6, с. 3-13.

Молчанов А.А. 1973. Влияние леса на окружающую среду. – М.: Наука, 360 с.

Ольчев А.В., Курбатова Ю.А., Татаринцов Ф.А., Молчанов А.Г., Варлагин А.В., Горшкова И.И., Выгодская Н.Н. 2009. Оценка первичной валовой и чистой продуктивности еловых лесов Центрально-Европейской части России с помощью полевых измерений и математической модели – Успехи современной биологии, т. 129, № 6, с. 565–578.

Сафонов С.С., Карелин Д.В., Грабар В.А., Латышев Б.А., Грабовский В.И., Уварова Н.Е., Замолодчиков Д.Г., Коротков В.Н., Гитарский М.Л. 2012. Эмиссия диоксида углерода от разложения валежа в южнотаёжном ельнике. – Лесоведение, № 5, с. 44-49.

Федоров С.Ф. 1977. Исследование элементов водного баланса в лесной зоне Европейской территории СССР. – Л., Гидрометеиздат, 264 с.

Чебакова Н.М., Выгодская Н.Н., Арнет А., Белелли Маркезини Л., Курбатова Ю.А., Парфенова Е.И., Валентини Р., Верховец С.В., Ваганов Е.А., Шульце Е.Д. 2014. Энерго- и массообмен и продуктивность основных экосистем Сибири (по результатам измерений методом турбулентных пульсаций). 2. Углеродный обмен и продуктивность – Известия РАН. Серия биологическая, № 1, с. 65–75

Юзбеков А.К., Замолодчиков Д.Г., Иващенко А.И. 2014. Фотосинтез ели европейской в лесных экосистемах экспериментального полигона «Лог таежный». – Вестник Московского университета, серия 16, биология, № 4, с. 32-35.

Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Venetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. – *Forest Ecology and Management*, vol. 259, pp. 660–684.

Burba G.G., Anderson D.J., Xu L., McDermitt D.K. 2006. Correcting apparent off-season CO₂ uptake due to surface heating of an open path gas analyzer: progress report of an ongoing study. – *Proceedings of 27th Annual Conference of Agricultural and Forest Meteorology*, San Diego, California. – American Meteorological Society, pp. 1-13.

Global Carbon Project. 2015. Carbon budget and trends. – Available at: www.globalcarbonproject.org.

Kotani A., Kononov A.V., Ohta T., Maximov T.C. 2014. Temporal variations in the linkage between the net ecosystem exchange of water vapour and CO₂ over boreal forests in eastern Siberia. – *Ecohydrology*, vol. 7, pp. 209–225.

Kurbatova J., Li C., Varlagin A., Xiao X., Vygodskaya N. 2008. Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia. – *Biogeosciences*, vol. 5, pp. 969-980.

Kurbatova J., Tatarinov F., Molchanov A., Varlagin A., Avilov V., Kozlov D., Ivanov D., Valentini R. 2013. Partitioning of ecosystem respiration in a paludified shallow-peat spruce forest in the southern taiga of European Russia. – *Environment Research Letters*, vol. 8, 045028 (9 p.).

Luysaert S., Schulze E.-D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P., Grace J. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. – *Nature*, vol. 455, pp. 213-215.

Sitch S., Friedlingstein P., Gruber N. et al. 2015. Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide. – *Biogeosciences*, vol. 12, pp. 653-679.

Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Ivaschenko A.I. 2000. Sensitivity of tundra carbon balance to ambient temperature. – *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 119, No. 1/4, pp. 157-169.

Статья поступила в редакцию: 02.12.2016

После переработки: 14.12.2016