

Сезонная изменчивость потоков диоксида углерода, явного и скрытого тепла в северотаежном лиственничном лесу Средней Сибири по данным пульсационных измерений

А. В. Ольчев*, В. И. Зырянов**,
Е. М. Сатосина*, Е. В. Фокеев*,
Ю. В. Мухартова*, ***, Е. Ю. Новенко*,
А. С. Прокушкин**

По результатам полевых наблюдений за потоками парниковых газов в ненарушенном северотаежном лиственничном лесу Средней Сибири в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты с помощью метода турбулентных пульсаций (eddy covariance) с конца мая по конец сентября 2013 и 2015 гг. были получены данные о сезонной и суточной изменчивости потоков диоксида углерода (CO_2), явного и скрытого тепла, а также о чувствительности потоков к изменению внешних условий. Результаты измерений показали хорошо выраженный сезонный и суточный ход потоков CO_2 , явного и скрытого тепла. Было установлено, что при малооблачной погоде июня и июля 2013 и 2015 гг. отмечалось устойчивое превышение потоков явного тепла над затратами тепла на испарение. Преимущественно облачная и дождливая погода второй половины лета привела к уменьшению затрат тепла на турбулентный теплообмен и к росту затрат на испарение. Среднесуточные значения поглощения CO_2 лиственничником с начала июня по середину августа 2013 и 2015 гг. превышали значения среднесуточной эмиссии CO_2 . Максимальное поглощение CO_2 отмечалось в конце июня — начале июля, прежде всего вследствие большой скорости фотосинтеза, определяемой большими значениями приходящей солнечной радиации, оптимальной температурой воздуха и достаточным почвенным увлажнением. Начиная с середины августа баланс между поглощением CO_2 лиственничником и его эмиссией приближался к нулевым значениям. Суммарная величина нетто экосистемного обмена CO_2 за вегетационный период 2013 г. составила $-76,5 \text{ г С/м}^2$, тогда как за вегетационный период 2015 г. она была несколько больше ($-103,6 \text{ г С/м}^2$), прежде всего за счет более высоких значений температуры воздуха в июне и большего количества выпавших осадков в период с июня по август 2015 г.

Ключевые слова: потоки диоксида углерода, метод турбулентных пульсаций, лиственничный лес, северная тайга, многолетняя мерзлота.

DOI: 10.52002/0130-2906-2022-10-111-120

* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова; e-mail: aoltche@gmail.com (Ольчев Александр Валентинович).

**Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук — обособленное подразделение Федерального исследовательского центра Красноярского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук.

***Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Введение

Бореальные леса покрывают около 9% поверхности суши Земли и аккумулируют более четверти запасов общего земного углерода в биомассе, растительности и почве [5, 8]. Около 44% бореальных лесов находятся в Сибири, 34% — в Канаде и на Аляске и 22% — в Европе. Леса севера Канады, Аляски и Европы состоят преимущественно из хвойных пород деревьев, таких как пихта, ель, лиственница и сосна, с участием мелколиственных пород. В России сосредоточено около 20% мировых запасов лесных ресурсов [8]. Лесные экосистемы выполняют множество экологических функций, формируют радиационный, водный и углеродный баланс земной поверхности, тем самым оказывая существенное влияние на климатическую систему. Роль лесной растительности в углеродном балансе заключается прежде всего в поглощении диоксида углерода (CO_2) из атмосферы в процессе фотосинтеза и накоплении углерода в наземной и подземной биомассе и почве [2, 12, 22]. Одновременно с поглощением CO_2 из атмосферы лесные экосистемы также активно выделяют CO_2 при автотрофном и гетеротрофном дыхании [12].

Для мониторинга потоков парниковых газов в метеорологических и экологических исследованиях применяется множество прямых и косвенных методов, среди которых наибольшее распространение в последние десятилетия получил метод турбулентных пульсаций (eddy covariance) [7, 9]. Станции мониторинга, использующие данную методику, распространены по всему земному шару. Определение потоков на этих станциях выполняется стандартизированным оборудованием по единой методике измерений и обработки данных, что гарантирует не только хорошую сопоставимость результатов, но и получение репрезентативной глобальной картины эмиссии и поглощения основных парниковых газов земной поверхностью [7, 20].

Сеть станций мониторинга потоков парниковых газов в наземных экосистемах на территории России пока редкая, и станции наблюдений за потоками распределены по территории крайне неравномерно. Значительные территории Российской Федерации, и в том числе в Центральной и Западной Сибири, остаются частично или почти полностью неисследованными в контексте их роли в региональном и глобальном углеродном балансе и их влияния на климатическую систему [24]. При изучении роли природных экосистем Сибири в современных изменениях климата выделяются вопросы, связанные с временной изменчивостью потоков парниковых газов в регионе, влиянием многолетней мерзлоты на углеродный баланс и потоки парниковых газов в лесных и болотных экосистемах, ролью лесных экосистем в формировании регионального и глобального углеродного баланса, и др. Отсутствие экспериментальных данных о потоках парниковых газов создает существенные сложности в получении адекватных региональных оценок составляющих углеродного баланса земной поверхности высокого пространственного и временного разрешения.

Основной целью данного исследования было получение экспериментальных данных о временной изменчивости потоков диоксида углерода, явного и скрытого тепла в ненарушенном старовозрастном северотаежном лиственничнике Средней Сибири, а также оценка чувствительности потоков к изменению факторов внешней среды.

Общая характеристика района исследований

Исследования потоков CO_2 , явного и скрытого тепла проводились в 120-летнем лиственничнике, расположенном на слегка наклонной поверхности древней речной террасы р. Нижняя Тунгуска (приток Енисея) в Эвенкийском муниципальном районе Красноярского края ($64^{\circ}12$ с. ш., $100^{\circ}27$ в. д., 250 м над уровнем моря) с конца мая по конец сентября 2013 и 2015 гг. (рис. 1).

Климат района исследований — субарктический континентальный. Согласно стационарным многолетним наблюдениям в п. Тура, средняя годовая температура воздуха за весь период наблюдений (1929—2019 гг.) составляет $-8,8^{\circ}\text{C}$. Средняя температура воздуха в июне — августе составляет $14,1^{\circ}\text{C}$, тогда как в зимние месяцы она может опускаться до -45°C и ниже, что характеризует район исследований как один из самых холодных районов произрастания светлохвойных лесов в мире. Среднегодовое количество осадков составляет около 370 мм, из которых около 46% выпадает в летние месяцы, с июня по август. Несмотря на относительно небольшое количество осадков, достаточно низкие среднегодовые значения температуры способствуют формированию на исследуемой территории условий избыточного увлажнения [23]. Территория относится к зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты.

Район исследования находится в подзоне северной тайги. Древостой представлен лиственницей Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), а именно генерацией деревьев, восстановившейся после низового пожара в 1896 г.

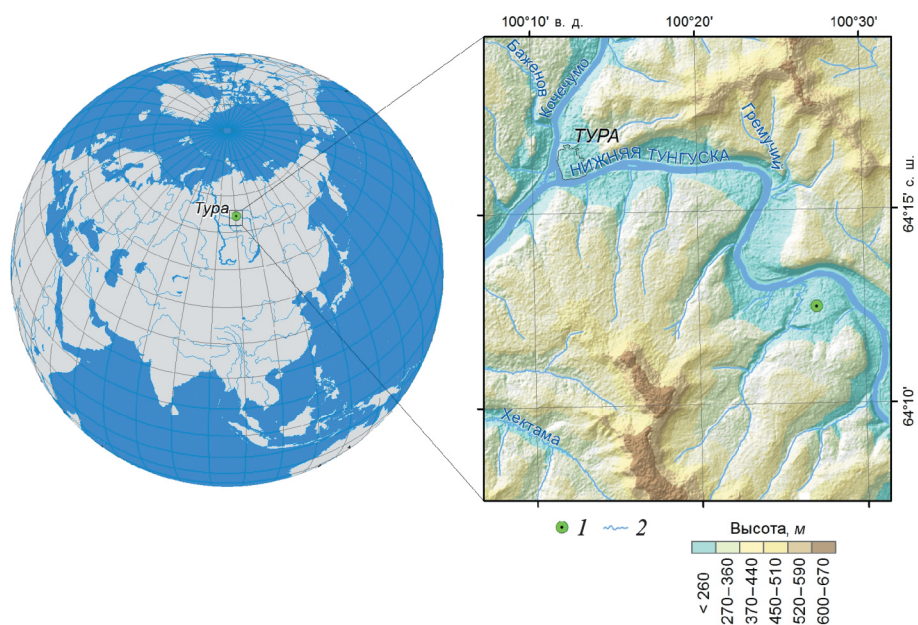


Рис. 1. Географическое положение района исследований.

1 — мачта; 2 — реки. Приведена шкала высоты над уровнем моря.

[11]. Согласно данным лесотаксации [10], густота древостоя составляет 550 деревьев/га, средний диаметр деревьев на высоте 1,3 м — около 3 см, а средняя высота — 3,4 м. Диаметр кроны деревьев обычно не превышает 1—2 м, и кроны соседних деревьев редко перекрываются [17]. В травяно-кустарничковом ярусе преобладают бореальные кустарнички *Ledum palustre* L., *Vaccinium uliginosum* L., *V. vitis-idaea* L.; доминантами лишайниково-мохового покрова, формирующими сплошной покров, являются *Cladina* spp., *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Aulacomnium turgidum* (Wahlenb.) Schwaegr., *A. palustre* (Hedw.) Schwaegr.

Почвенный покров на участке представлен торфяно-криоземом перегнойным (Histic Turbic Cryosol (Loamic, Humic)) [1] с признаками оглеения на глубине 50—70 см. Глубина сезонноталого слоя в сентябре достигает около 1 м, мощность органического горизонта почвы превышает 15 см. Основанием почв служат аллювиальные отложения старого речного русла р. Нижняя Тунгуска. Выположенный рельеф и суглинистые почвы способствуют плохому просачиванию влаги и активному заболачиванию.

Методика полевых измерений

Измерения потоков CO₂, явного и скрытого тепла проводились методом турбулентных пульсаций (eddy covariance) с помощью оборудования, установленного на метеорологической вышке высотой 18 м над пологом древостоя [17]. Определение турбулентных потоков методом турбулентных пульсаций основано на расчете ковариации высокочастотных измерений вертикальной составляющей скорости ветра w ($w(t) = w(t) - \bar{w}$) и исследуемой субстанции, например концентрации диоксида углерода C ($C(t) = C(t) - \bar{C}$), за некоторый промежуток времени t [7, 9, 13]:

$$F = \overline{wC}.$$

В состав измерительного оборудования на метеорологической вышке входили приборы для высокочастотных измерений составляющих скорости ветра, температуры, концентрации водяного пара и CO₂, а также метеорологические приборы для измерения радиационного баланса и приходящей солнечной радиации, температуры и влажности воздуха, количества осадков, потока тепла в почву (см. таблицу).

Расчет потоков осуществлялся с помощью программного обеспечения EddyPro (“LI-COR”, США) в соответствии с регламентом обработки данных с учетом всех необходимых поправок (в том числе поправок для учета влияния флуктуаций плотности воздуха на поток, восстановления высокочастотной и низкочастотной частей спектра и коспектра, удаления случайных аномальных пульсаций и устранения сдвига во временных рядах скорости ветра, концентрации водяного пара и CO₂, для учета поворота системы координат и устранения существующих трендов в колебаниях) [7]. В соответствии с регламентом обработки пульсационных данных, в исследовании было выполнено определение зоны выноса (footprint) и проведена фильтрация измеренных значений потоков при низкой турбулентности. Заполнение пропусков во временных рядах проводилось с помощью программного пакета REddyProc (<https://www.bgcjena.mpg.de/bgi/index.php/Services/REddyProcWebRPackage>).

Метеорологическое оборудование, установленное на метеорологической вышке в лиственный лесу (http://asiaflux.net/index.php?page_id=117)

Оборудование	Измерительный прибор
Оборудование для измерений потоков CO ₂ , явного и скрытого тепла	
Ультразвуковой анемометр-термометр	R3-50, "Gill Instruments", Великобритания
Газоанализатор CO ₂ и водяного пара	LI-7500, "LI-COR", США
Устройство для накопления данных (даталоггер)	CR-3000, "Campbell Scientific", США
Метеорологическое оборудование	
Датчик температуры и влажности атмосферного воздуха	Vaisala HM45A, "Vaisala", Финляндия
Датчик осадков	52202, "RM Young", США
Радиометр	CNR1, "Kipp & Zonen", Нидерланды
Датчик фотосинтетически активной радиации	LI-190SA, "LI-COR", США
Почвенный термометр	CPT, "Climatec", Япония
Датчик почвенной влажности	CS-616, "Campbell Scientific", США
Датчик измерения потоков тепла с поверхности почвы	HF-01; "REBS", Делфт, Нидерланды
Устройство для накопления данных (даталоггер)	CR-10X, "Campbell Scientific", США

Измерения составляющих скорости ветра, температуры, содержания водяного пара и концентрации CO₂ в воздухе проводились с частотой 5 Гц. Расчет потоков, а также осреднение метеорологических величин проводились для 30-минутного временного интервала.

Результаты и их обсуждение

Условия погоды в течение всего периода измерений с июня по сентябрь 2013 и 2015 гг. характеризовались значительной изменчивостью и в целом были близки к средним многолетним. Среднесуточная температура изменялась от 10°C в начале июня до 23°C в середине июня и июле (рис. 2). В последней декаде июня 2013 г. отмечалось незначительное похолодание со среднесуточными значениями температуры от 10 до 14°C. Начиная с конца июля 2013 и 2015 гг. отмечается постепенное снижение среднесуточных значений температуры до 5—9°C в конце августа — середине сентября при незначительных межсуточных колебаниях.

Анализируя временную изменчивость осадков в периоды измерений, стоит отметить их значительную неоднородность. Если в июле 2013 г. и в июне — июле 2015 г. отмечалась относительно засушливая погода, то в августе 2013 и 2015 гг. погода была достаточно дождливой. В 2013 г. за период измерений было отмечено 27 дней с осадками, в 4 из которых сумма осадков превысила 10 мм. Всего за период наблюдений в 2013 г. выпало 118,5 мм осадков. В 2015 г. число дней с осадками составило 35, при этом лишь для 3 дней сумма выпавших осадков превышала 10 мм. Всего за период наблюдений в 2015 г. выпало 132 мм осадков.

Максимальные значения радиационного баланса наблюдались в июне — июле (7—12 МДж/(м² сут)). На фоне уменьшения приходящей солнечной радиации в августе — начале сентября 2013 и 2015 гг. значения радиационного баланса снизились до 2—5 МДж/(м² сут). Изменения радиационного баланса и запасов доступной почвенной влаги, определяемые

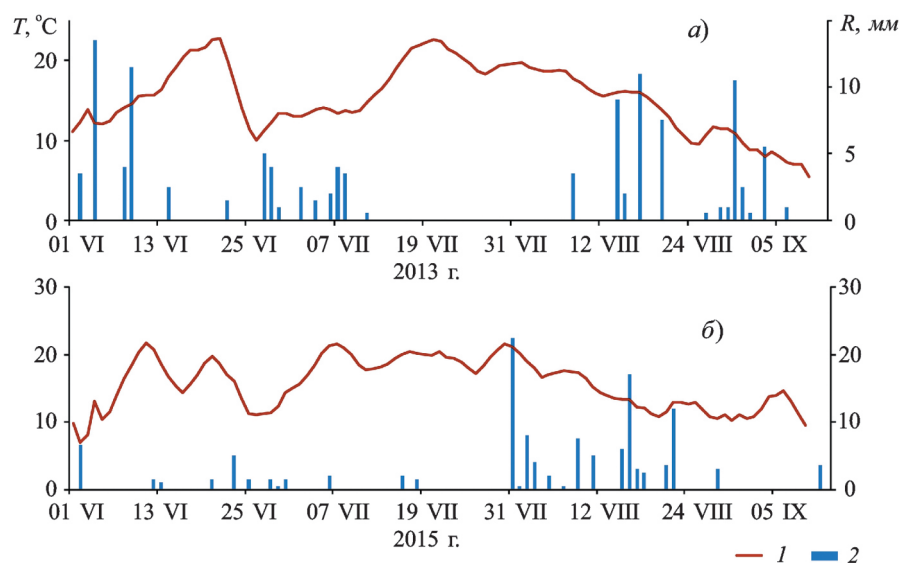


Рис. 2. Сезонная изменчивость среднесуточных значений температуры (1) и количества осадков (2) в 2013 и 2015 гг.

динамикой выпадающих осадков, явились факторами, формирующими соотношение потоков явного (H) и скрытого (LE) тепла в тепловом балансе исследуемой лесной экосистемы (рис. 3а). В июне 2013 г. на фоне регулярно выпадающих осадков суточные суммы LE изменялись в пределах от 4 до 5 $МДж/(м^2 \text{ сут})$, а отношение Боуэна ($= H/LE$) составляло от 0,7 до 1,2. В более засушливую первую половину лета 2015 г. величина в июне изменялась от 0,7 до 2,2. На фоне дефицита осадков в июле 2013 и 2015 гг. отмечается постепенное снижение LE до 2,3 $МДж/(м^2 \text{ сут})$ при росте до 2,0—2,2. Несмотря на уменьшение радиационного баланса в августе — сентябре интенсивно выпадающие осадки способствовали удержанию высоких значений LE в диапазоне от 2,5 до 3,8 $МДж/(м^2 \text{ сут})$. Величина в этом период была существенно меньше 1 и варьировалась в диапазоне от 0,2 до 0,7. Выявленное уменьшение LE и рост в середине лета были, очевидно, обусловлены уменьшением скорости транспирации лиственницы на фоне уменьшения доступной почвенной влаги в корнеобитаемом слое при отсутствии осадков. Сходная динамика LE и при дефиците осадков и доступной почвенной влаги в корнеобитаемом слое отмечалась при засухе в лиственничном (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) лесу в Центральной Якутии [6] и в хвойно-мелколиственном лесу в подзоне южной тайги на европейской части России [18, 19]. В силу наблюдаемого более существенного дефицита осадков в Якутии в летние месяцы величина H там, однако, устойчиво превосходила величину LE [6].

Суточная изменчивость потоков LE и H определялась суточным ходом радиационного баланса и биотическими свойствами лиственницы, регулирующими процесс транспирации. Максимальные значения LE наблюдались преимущественно в предполуденные и полуденные часы, тогда как максимум H приходился на послеполуденное время. Величина H в днев-

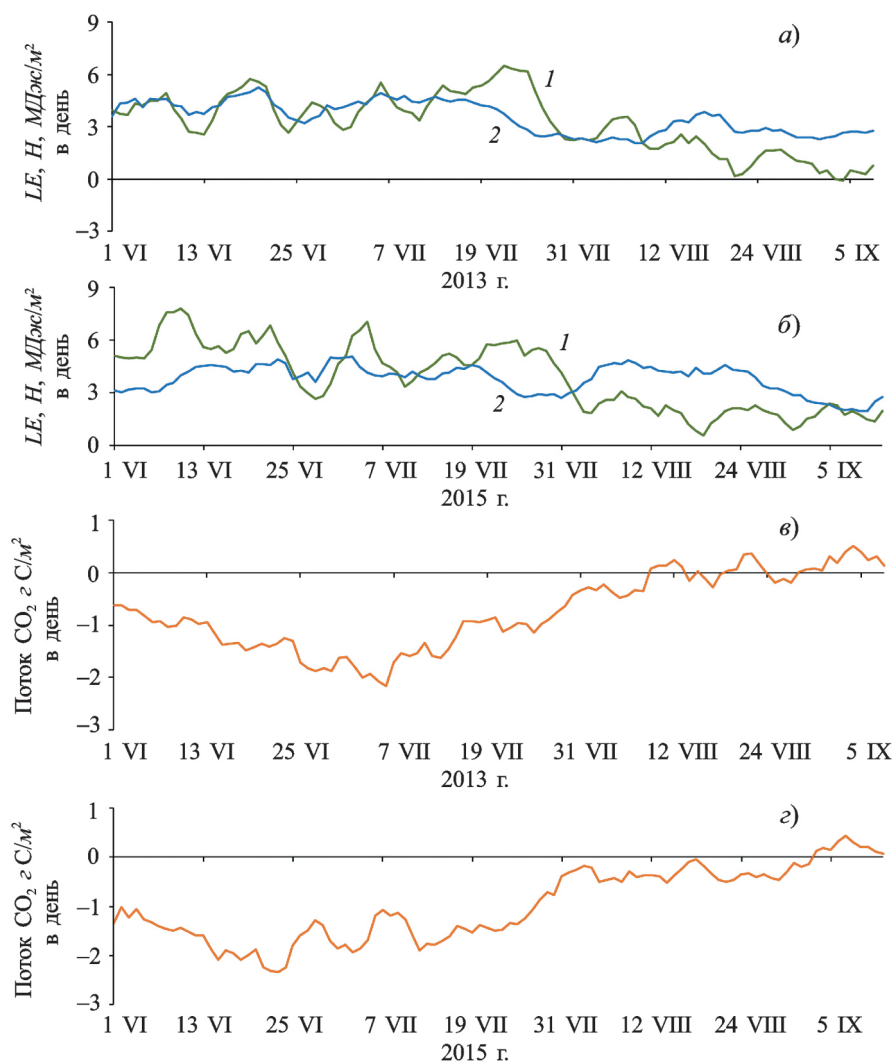


Рис. 3. Сезонная изменчивость среднесуточных значений потоков явного (1) и скрытого (2) тепла (а, б) и потоков CO_2 (в, г) в северотаежном лиственничнике в 2013 (а, в) и 2015 гг. (б, г).

ное время суток обычно превышала LE (значение варьировалось от 1,0 до 1,4), за исключением периодов с осадками, когда оно было устойчиво меньше 1. В периоды без существенных осадков (июль 2013 и 2015 гг.) величина в дневные часы изменялась в диапазоне от 1,8 до 2,3. Максимальные значения LE в предполуденное время определялись максимальными значениями устьичной проводимости в утренние часы. В послеполуденное время на фоне уменьшения влагообеспеченности хвои и устьичной проводимости величина LE несколько снижалась, что вело к увеличению потоков явного тепла.

Суммарная величина нетто экосистемного обмена CO_2 (NEE) в 2013 г. составила $-76,5 \text{ г C/m}^2$, а в 2015 г. $-103,6 \text{ г C/m}^2$. Анализ сезонной изменчивости потоков CO_2 показывает, что лиственничный лес, даже несмотря

на наблюдаемый дефицит доступной влаги в почве, в отдельные летние месяцы служил устойчивым стоком CO_2 из атмосферы (рис. 3б). Максимальные скорости поглощения CO_2 в 2013 г. отмечались в начале июля (до $2,2 \text{ г C}/(\text{м сут})$), а в 2015 г. — в конце июня (до $2,3 \text{ г C}/(\text{м сут})$). Данные закономерности определяются прежде всего оптимальными условиями освещения и температуры, а также фенологическими особенностями сезонного развития лиственницы в регионе. Июльские значения потока CO_2 в 2013 и 2015 гг. на фоне уменьшения доступной почвенной влаги в корнеобитаемом слое в отсутствие осадков варьировались в середине июля от $-1,6$ до $-1,8 \text{ г C}/(\text{м сут})$ и уменьшались к концу июля до $-0,5 \dots -0,8 \text{ г C}/(\text{м сут})$. Таким образом, несмотря на недостаток доступной почвенной влаги, в середине лета исследуемая экосистема продолжала активно поглощать CO_2 из атмосферы, прежде всего за счет высоких значений валовой первичной продукции, превышающей значения экосистемного дыхания. Динамика потоков CO_2 в августе как в 2013, так и в 2015 г. на фоне увеличения осадков отличалась незначительной изменчивостью с колебаниями в диапазоне от $-0,7$ до $0,3 \text{ г C}/(\text{м сут})$.

Тенденция к уменьшению потоков CO_2 в засушливые месяцы летнего периода отмечалась в целом ряде исследований, и в частности в исследованиях потоков CO_2 в лиственничном лесу в Центральной Якутии [6]. Данные пульсационных измерений, проведенных в лиственничном (*Larix sibirica* Ledeb.) лесу в Центральной Монголии [16], показали более высокие значения потоков CO_2 в летние месяцы ($-1,8 \dots -3,6 \text{ г C}/(\text{м сут})$), что может быть связано как с межвидовыми различиями, так и с более высокой тепло- и влагообеспеченностью района исследований в летние месяцы.

Определенные изменения скорости эмиссии и поглощения CO_2 во второй половине лета могут быть связаны с увеличением глубины сезонного оттаивания многолетней мерзлоты в районе исследований. Как показано в ряде исследований [14—17], таяние многолетней мерзлоты, с одной стороны, может привести к высвобождению запасов захороненного углерода за счет активного микробного разложения органического материала оттаявших почвенных горизонтов, а с другой стороны — к стимулированию роста растений, компенсирующих потери почвенного углерода [14]. Как результат, влияние таяния многолетней мерзлоты на потоки CO_2 может в значительной степени определяться темпами ее таяния и глубиной залегания [21].

Заключение

Результаты проведенного исследования показали значительную сезонную и суточную изменчивость потоков CO_2 , явного и скрытого тепла, определяемую как метеорологическими условиями (температура, солнечная радиация, осадки), так и различными биофизическими факторами. Если величина потоков H и LE в значительной степени определялась величиной радиационного баланса, то их соотношение зависело главным образом от количества выпавших осадков, определяющих влагообеспеченность корнеобитаемого слоя почвы и, как следствие, скорость транспирации рас-

тений. Исследуемая лесная экосистема на протяжении летних периодов 2013 и 2015 гг. служила стоком CO₂ из атмосферы. Наблюдаемые в летнее время продолжительные периоды без осадков привели лишь к незначительному уменьшению эвапотранспирации и нетто-поглощения CO₂ лесной растительностью. Таким образом, исследуемый старовозрастный северотаежный лиственничник оставался устойчивым стоком CO₂ из атмосферы в летний период во всем диапазоне изменчивости метеорологических параметров.

Измерения потоков парниковых газов проводились в рамках Государственного задания № 0287-2021-0008. Анализ структуры растительности на экспериментальном участке проведен Е. Ю. Новенко и А. С. Прокушкиным в рамках выполнения гранта Российского научного фонда № 20-17-00043. Исследование по интерпретации данных наблюдений, выполненное А. В. Ольчевым и Е. А. Сатосиной, было поддержано грантом Российского научного фонда № 22-17-00073.

Литература

1. Старцев В. В., Дымов А. А., Прокушкин А. С. Почвы постпирогенных лиственничников Средней Сибири: морфология, физико-химические свойства и особенности почвенного органического вещества. — Почвоведение, 2017, № 8, с. 912—925.
2. Beer C., Reichstein M., Tomelleri E., et al. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. — Science, 2010, vol. 329, pp. 834—838.
3. Bonan G. B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. — Science, 2008, vol. 320, pp. 1444—1449.
4. Bonan G. B., Pollard D., and Thompson S. L. Effects of boreal forest vegetation on global climate. — Nature, 1992, vol. 359, pp. 716—718.
5. Bradshaw C. J. A. and Warkentin I. G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux. — Global and Planetary Change, 2015, vol. 128, pp. 24—30.
6. Dolman A., Maximov T., Moors E., Maximov A., Elbers J., Kononov A., Waterloo M., and van der Molen M. Net ecosystem exchange of carbon dioxide and water of far eastern Siberian larch (*Larix cajanderii*) on permafrost. — Biogeosciences, 2004, vol. 1, No. 2, pp. 133—146.
7. Aubinet M., Vesala T., and Papale D. (eds.) Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. — Dordrecht, The Netherlands Springer, 2012, 438 p.
8. FAO 2020. Global Forest Resources Assessment 2020—Key Findings. — Rome; <https://doi.org/10.4060/ca8753en>.
9. Ibrom A., Schutz C., Tworek T., Morgenstern K., Oltchev A., Falk M., Constantin J., and Gravenhorst G. Eddy-correlation measurements of fluxes of CO₂ and H₂O above a spruce forest. — J. Phys. Chem. Earth, 1996, vol. 21, No. 5—6, pp. 409—414.
10. Kajimoto T., Osawa A., Matsuura Y., Abaimov A. P., Zyryanova O. A., Kondo K., Tokuchi N., and Hirobe M. Individual-based measurement and analysis of root system development: Case studies for *Larix gmelinii* trees growing on the permafrost region in Siberia. — J. For. Res., 2007, vol. 12, pp. 103—112.
11. Knorre A. A., Siegwolf R. T. W., Kirdeyanov A. V., Saurer M., Churakova (Sidorova) O. V., and Prokushkin A. S. Fire as a major factor in dynamics of tree-growth and stable ¹³C and ¹⁸O variations in larch in the permafrost zone. — Forests, 2022, vol. 13, 725.
12. Luyssaert S., Inglima I., Jung M., et al. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. — Global Change Biol., 2007, vol. 13, pp. 2509—2537.

- 13. Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Mukhartova Yu., Krupenko A., Ivanov D., Levashova N., and Olchev A.** 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. — *Environ. Res. Lett.*, 2016, vol. 11, No. 12, 125012.
- 14. Mauritz M., Bracho R., Celis G., Hutchings J., Natali S. M., Pegoraro E., Salmon V. G., Schadel C., Webb E. E., and Schuur E. A. G.** Non-linear CO₂ flux response to seven years of experimentally induced permafrost thaw. — *Global Change Biol.*, 2017, vol. 23, No. 9, pp. 3646—3666.
- 15. Mauritz M., Pegoraro E., Ogle K., Ebert Ch., and Schuur E. A. G.** Investigating thaw and plant productivity constraints on old soil carbon respiration from permafrost. — *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, 2021, vol. 126 No. 6, e2020JG006000.
- 16. Miyazaki S., Ishikawa M., Baatarbileg N., Damdinsuren S., Ariuntuya N., and Jambaljav Y.** Interannual and seasonal variations in energy and carbon exchanges over the larch forests on the permafrost in northeastern Mongolia. — *Polar Science*, 2014, vol. 8, No. 2, pp. 166—182.
- 17. Nakai Y., Matsuura Y., Kajimoto T., Abaimov A. P., Yamamoto S., and Zyryanova O. A.** Eddy covariance CO₂ flux above a Gmelin larch forest on continuous permafrost in central Siberia during a growing season. — *Theor. Appl. Climatol.*, 2008, vol. 93, pp. 133—147.
- 18. Oltchev A., Cermak J., Gurtz J., et al.** The response of the water fluxes of the boreal forest region at the Volga's source area to climatic and land-use changes. — *J. Phys. Chem. Earth*, 2002, vol. 27, No. 9—10, pp. 675—690.
- 19. Oltchev A., Cermak J., Nadezhdina N., Tatarinov F., Tishenko A., Ibrom A., and Gravenhorst G.** Transpiration of a mixed forest stand: Field measurements and simulation using SVAT models. — *J. Boreal Environ. Res.*, 2002, vol. 7, No. 4, pp. 389—397.
- 20. Pastorello G., Trotta C., Canfora E., et al.** The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. — *Sci. Data*, 2020, vol. 7, 225.
- 21. Schuur E. A. G., Sickman J. O., Osterkamp T. E., Lee H., Vogel J. G., and Crummer K. G.** The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra. — *Nature*, 2009, vol. 459, 7246, pp. 556—559.
- 22. Shvidenko A. Z., Gustafson E., McGuire A. D., et al.** Terrestrial ecosystems and their change. Chapter 6. /In: *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. P. Ya. Groisman and G. Gutman (eds.). — Springer Environmental Science and Engineering, The Netherlands, 2013, pp. 171—249.
- 23. Tchebakova N. M., Parfenova E., Lysanova G., and Soja A.** Agroclimatic potential across central Siberia in an altered twenty-first century. — *Environ. Res. Lett.*, 2011, vol. 6, 045207.
- 24. Virkkala A.-M., Natali S. M., Rogers B. M., et al.** The ABCflux database: Arctic-boreal CO₂ flux observations and ancillary information aggregated to monthly time steps across terrestrial ecosystems. — *Earth System Science Data*, 2022, vol. 14, No. 1, pp. 179—208.