

УДК 630*182+581.55+582.475

ПОТОКИ УГЛЕРОДА В ЭКОСИСТЕМАХ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ

А. В. Панов¹, А. В. Махныкина^{1,2}, А. В. Урбан¹, В. И. Зырянов¹, Д. А. Полосухина^{1,2},
Е. А. Кукавская¹, В. Е. Арясов¹, Р. А. Колосов¹, И. Р. Путилин¹, П. Д. Третьяков¹,
Д. В. Трусов¹, Р. Т. Садыков¹, А. С. Прокушкин^{1,2}

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

² Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

E-mail: alexey.v.panov@gmail.com

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

Наблюдаемый рост температуры, вызванный увеличением концентраций климатически активных (парниковых) газов в атмосфере, в первую очередь диоксида углерода (CO₂) и метана (CH₄), может быть причиной прогнозируемого высвобождения углерода, аккумулированного за тысячелетия на обширных территориях северных широт. Масштабы и длительность ожидаемого эффекта остаются открытым вопросом, что обусловлено спорадичностью количественных оценок потоков углерода. В работе отражены текущий статус, направления и основные результаты многолетних инструментальных исследований потоков углерода в экосистемах подзоны средней тайги Центральной Сибири, на базе Средне-Енисейского стационара Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (обсерватории ZOTTO). Представлена динамика концентрации CO₂ и CH₄ в атмосфере с 2009 по 2020 г. Приведены данные чистого экосистемного обмена CO₂ для лесоболотных комплексов, свидетельствующие, что они выступают поглотителем (стоком) CO₂ атмосферы. Для репрезентативных экосистем дана оценка почвенных эмиссионных потоков CO₂ и сезонный ход фотосинтетической ассимиляции углерода доминантами подчиненного яруса растительности. Выявлены закономерности поведения растворенных форм углерода в водах ручьев, дренирующих олиготрофный и эвтрофный болотные массивы в районе исследований, представлены показатели эмиссии CO₂ с водной поверхности.

Ключевые слова: атмосфера, климат, диоксид углерода, метан, обменные потоки углерода.

DOI: 10.15372/SJFS20240305

ВВЕДЕНИЕ

Выступая масштабным резервуаром наземного углерода (McGuire et al., 2009; Dolman et al., 2012; Hugelius et al., 2014), экосистемы северных широт играют существенную роль в регулировании глобальных и региональных углеродных и гидрологических циклов, газового режима атмосферы и климатических обратных связей (Bonan, 2008). Наблюдаемый рост температуры, вызванный стабильным увеличением концентраций климатически активных (парниковых) газов (ПГ) в атмосфере, среди которых основная роль

отводится диоксиду углерода (CO₂) и метану (CH₄), может выступать потенциальным триггером нестабильности и высвобождения углерода, аккумулированного за тысячелетия в зоне высоких широт (Hayes et al., 2014; Schuur et al., 2015; Romanovsky et al., 2015). Оценки обменных потоков углерода (C) свидетельствуют, что обширные территории арктической зоны являются стоками для CO₂ (200–400 Тг С/год) (Dolman et al., 2012; McGuire et al., 2012; Швиденко, Щепаченко, 2014; Richter-Menge et al., 2019) и источниками для CH₄ (33–46 Тг С/год) (McGuire et al., 2009, 2012). Будут ли современные резервуары

углерода претерпевать изменения при потеплении климата, остается открытым вопросом, что обусловлено спорадичностью количественных оценок баланса углерода в наземных экосистемах высоких широт.

Начало развитию наблюдений углеродного обмена в экосистемах Центральной Сибири положено в 1996 г., с проведением первых пилотных измерений чистого экосистемного обмена (ЧЭО) в сосняках среднетаежной подзоны методом турбулентных (микродинамических) пульсаций (ТП) (Schulze et al., 1999). Более детальные исследования энерго- и массообмена в экосистемах запущены в 1998 г. в районе п. Зотино Туруханского р-на Красноярского края в рамках реализации международного проекта «Евросибирские потоки углерода» (Eurosiberian carbonflux) в 1998–2000 гг. (Heimann et al., 2002). На протяжении 3 лет исследования проводились на базе эколого-климатических станций (ЭКС), размещенных в сосняке лишайниковом и торфяном болоте (Arneth et al., 2002; Schulze et al., 2002; Tchebakova et al., 2002; Lloyd et al., 2002; Shibistova et al., 2002). В 2000 г. в сезонном режиме измерения ЧЭО были дополнительно реализованы на правом берегу р. Енисей, в районе п. Ворогово Туруханского района Красноярского края, с размещением ЭКС в березняке, смешанном насаждении и пихтарнике (Röser et al., 2002). Продолжение исследований в экосистемах соснового леса и торфяного болота было реализовано в рамках международного проекта «Система наблюдения наземного углерода – Сибирь» (TCOS-Siberia) (2002–2004 гг.), после чего, в связи с окончанием международных программ, измерительные системы были демонтированы. Дальнейшее развитие мониторинговых исследований произошло в 2004–2006 гг. с созданием международной обсерватории ZOTTO в подзоне средней тайги и запуском круглогодичных прецизионных измерений динамики ПГ в пограничном слое атмосферы (ПСА) на базе 300-метровой высотной мачты (Winderlich et al., 2010; Тимохина и др., 2018; Timokhina et al., 2018; Урбан и др., 2019; Urban et al., 2019). Измерения обсерватории охватывают существенный территориальный домен, который более смещен на территорию Западной Сибири из-за характерного для района западного переноса. В период с 2012 по 2015 г. с привлечением международного и российского финансирования в районе обсерватории были размещены три ЭКС для измерений ЧЭО в ключевых экосистемах района исследований методом ТП: в лесоболотных ком-

плексах средней тайги – сосняке лишайниковом и верховом олиготрофном болоте (с 2012 г. по настоящее время) (Park et al., 2021) и среднетаежном пихтарнике Енисейского кряжа (2015–2019 гг.).

Водотоки, дренирующие болотные комплексы Западной Сибири обогащены растворенным органическим углеродом (РОУ) и являются вектором переноса терригенного органического углерода из наземных экосистем в конечный водоем стока – Северный Ледовитый океан (СЛО) (Frey, Smith, 2005). Пресноводные экосистемы характеризуются перенасыщением CO_2 и CH_4 относительно их уровней в атмосфере (Serikova et al., 2018) и представляют собой значимый источник ПГ в атмосферу. По оценкам (Karlsson et al., 2021), ежегодная эмиссия CO_2 с водного зеркала в Западной Сибири составляет до 0.1 Пг С/год при уровне глобальных эмиссий 3.9 Пг С/год (Drake et al., 2018). Годовые показатели эмиссии CO_2 могут превышать экспорт С в форме РОУ более чем в 2 раза (Serikova et al., 2018). Несмотря на подобные оценки, механизмы формирования стока углерода в различных болотных ландшафтах, его трансформация и минерализация в водотоках, и отклик этих процессов на происходящие изменения климата также требуют дальнейших исследований.

Цель настоящей работы: отразить текущий статус, направления и основные результаты многолетних инструментальных исследований потоков углерода в экосистемах подзоны средней тайги Центральной Сибири, на базе Средне-Енисейского стационара ИЛ СО РАН (обсерватории ZOTTO).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Современная стратегия количественной оценки углероддепонирующего потенциала (УДП) наземных экосистем, выбросов и поглощения ПГ предполагает комбинацию прямых инструментальных наблюдений потоков углерода (С) между экосистемой и атмосферой, инверсионного и процессного моделирования. В отличие от прямых инструментальных оценок потоков С в отдельных биогеоценозах методом динамических камер или турбулентных (микродинамических) пульсаций (так называемый восходящий режим моделирования, подход – bottom-up), инверсионное (обратное) моделирование выбросов и поглощения ПГ (нисходящий режим моделирования, подход – top-down) основан на использовании данных по газовому составу

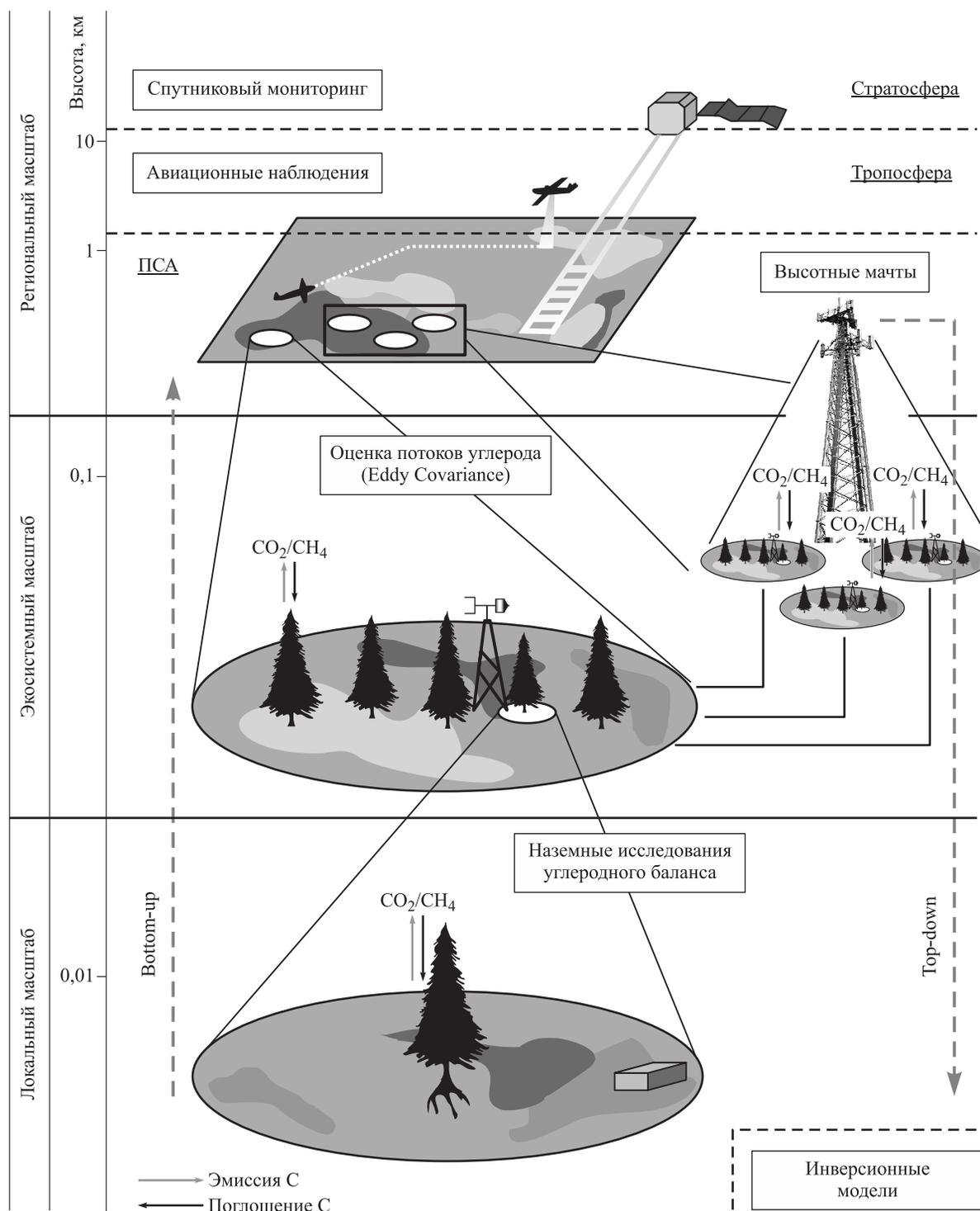


Рис. 1. Стратегия исследований углеродного обмена.

ву атмосферы, полученных на основе сочетания методов дистанционного зондирования Земли и определения содержания ПГ в столбе атмосферы с помощью космических аппаратов (например, GOSAT, GOSAT-2, GHGSat-D/CLAIRE, Метеор-М (Голомолзин и др., 2022; Golomolzin et al., 2022)), авиационных наблюдений и наземных мониторинговых площадок (рис. 1).

В последнем случае мониторинг газового режима на высоте относительно однородной части атмосферы (пограничный слой) осуществляется с использованием высотных мачт, а атмосфера выступает своеобразным интегратором процессов, отражающих текущие компенсационные способности биосферы. Наблюдения на таких мачтах (Winderlich et al., 2010) позволяют по-

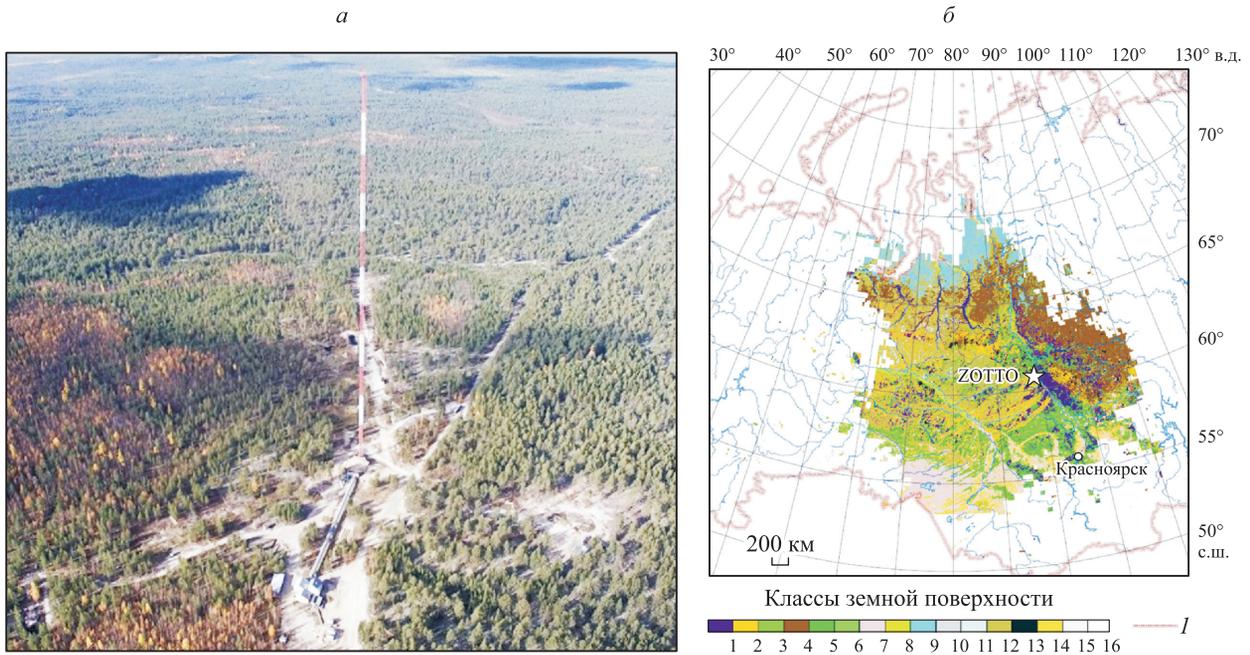


Рис. 2. Обсерватория ZOTTO (а) и пример расчета сезонного футпринта обсерватории (75 %) за 2012 г. (б) с классами подстилающей поверхности, согласно RLC (Урбан и др., 2019; Urban et al., 2019).

лучать сигналы потоков ПГ, интегрированных над значительным территориальным доменом ($> 1000 \text{ км}^2$), и избежать «шума», вызванного суточными колебаниями в экосистемных процессах обмена ПГ с атмосферой, инверсионными процессами накопления углеродсодержащих газов у поверхности земли и пр. Длительные мониторинговые исследования газового режима атмосферы дают возможность оценки вариаций в процессах энерго- и массообмена между атмосферой и наземными экосистемами, вызванных климатическими и антропогенными факторами.

Многолетняя программа мониторинговых исследований углеродного обмена в экосистемах Центральной Сибири, реализуемая в районе Средне-Енисейского опорного экспедиционного пункта (ОЭП) ИЛ СО РАН (обсерватории ZOTTO), предполагает сопряжение восходящей и нисходящей стратегий оценки УДП, что позволяет получить как локальные (биогеоценотические), так и интегрированные (ландшафтные) сигналы потоков углерода. Реализация нисходящего режима моделирования базируется на потенциале высотной (304 м) мачты обсерватории ZOTTO ($60^{\circ}48' \text{ с. ш.}, 89^{\circ}23' \text{ в. д.}$, высота 112 м н. у. м.), расположенной в среднетаежной подзоне Центральной Сибири (Winderlich et al., 2010; Heintzenberg et al., 2011; Тимохина и др., 2018; Timokhina et al., 2018), в 25 км западнее

п. Зотино Туруханского района Красноярского края (рис. 2, а).

Тип климата территории, по Кёппен-Гейгеру, – Dfc, холодный (континентальный), без сухого сезона, холодное лето. Среднегодовая температура воздуха составляет $-3.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, суммарное годовое количество осадков – 536 мм (метеостанция п. Бор, WMO ID: 23884). Рельеф территории представлен чередованием уплощённых холмов, валов и грив. Геоморфология, литология и климат способствуют значительной заболоченности, составляющей около 60 % территории. Структура растительного покрова определяется мозаикой лесных и болотных биогеоценозов, приуроченных к различным элементам ландшафта (Белов, 1984).

Вместе с тем территориальный домен интегрирования углеродных сигналов атмосферы на базе высотной мачты существенно шире и простирается от южной тайги до лесотундры и тундры. Так, среднегодовая зона охвата измерений (далее футпринт от англ. footprint) обсерватории (рис. 2, б), отражающая степень влияния подстилающей поверхности на регистрируемую динамику ПГ атмосферы, рассчитанная с использованием стохастической инверсионной транспортной модели STILT (Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport) (Урбан и др., 2019; Urban et al., 2019), варьирует в диапазоне от 2.4×10^6 до $4.2 \times 10^6 \text{ км}^2$. 75 % футпринт мачты

составляет 2 190 980 км² (1/68 площади планеты Земля). Область футпринта смещена к западу. Вероятный вклад отдельных категорий земель в суммарную величину футпринта: вечнозеленые хвойные леса – 39 ± 2 %, тундры – 11 ± 3 %, болота – 11 ± 1 %, смешанные леса – 10 ± 1 %, листопадные хвойные леса (лиственничники) – 9 ± 1 % и лиственные леса – 6 ± 2 % (Урбан и др., 2019; Urban et al., 2019).

На базе обсерватории с 2009 г. проводится квазинепрерывный прецизионный мониторинг концентраций CO₂, CH₄ и H₂O в пограничном слое атмосферы (ПСА) по вертикальному градиенту на 6 уровнях мачты (4, 52, 92, 158, 227 и 301 м) посредством газоанализатора EnviroSense 3000i (Picarro Inc., США). Регулярная калибровка инструмента сохраняет точность измерений на уровне, удовлетворяющем требованиям Всемирной метеорологической организации (ВМО). Помимо измерений ПГ атмосферы реализуется комплексная программа метеорологических наблюдений (вертикальный профиль мачты, наземные метеорологические площадки) с помощью широкого спектра метеорологического оборудования, сертифицированного ВМО. Подробное описание приборно-инструментальной базы обсерватории представлено ранее в работах J. Winderlich с соавт. (2010), J. Heintzenberg с соавт. (2011), А. В. Тимохиной с соавт. (2018; Timokhina et al., 2018). Перед аналитическими расчетами на основе алгоритма F. Reum с соавт. (2019) проводится коррекция первичных рядов данных ПГ атмосферы относительно содержания H₂O, при этом применяются калибровочные поправки и корректировки временного дрефта значений (Winderlich et al., 2010; Тимохина и др., 2018; Timokhina et al., 2018).

Восходящий режим наблюдений реализован непосредственно в районе обсерватории ЗОТТО на основе прямых инструментальных измерений обменных (ЧЭО), эмиссионных и фотоассимиляционных потоков углерода на эколого-климатических станциях в двух ключевых биогеоценозах территории: сосняк лишайниковый (рис. 3, а) и сосновый рям (рис. 3, б) (Куричева и др., 2023). Футпринты ЭКС, полученные на основе модельных расчетов с помощью Flux Footprint Prediction (Kljun et al., 2015), представлены на рис. 3, в, г.

ЭКС в экосистеме сосняка лишайникового расположена в 900 м к северо-востоку от обсерватории (рис. 3, а, в).

Ландшафт территории автоморфный. Тип почвы – подзол иллювиально-железистый, без

наличия подстилающих многолетнемерзлых пород (Dymov et al., 2022). Состав древостоя – 10С, представленный сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с возрастным диапазоном 80–180 лет.

Густота древостоя составляет 448 ± 88 шт./га, средняя высота – 20 м (Park et al., 2021). В структуре живого напочвенного покрова представлены брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea* L.) (30 %), багульник болотный (*Ledum palustre* L.) (5 %), кладонии звездчатая (*Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar & Vezda) и оленья (*Cladonia rangiferina* (L.) F. H. Wigg.) (75 %) и плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* (Willd. Ex Brid.) Mitt.) (10 %).

ЭКС на участке соснового ряма (среднего) расположена в ~ 2 км к северо-востоку от обсерватории ЗОТТО (рис. 3, б, г). Ландшафт участка: олиготрофное сфагновое болото, грядово-мочажинный комплекс. Тип почвы – торфяная олиготрофная типичная. Возраст торфа варьирует от 9397 ± 134 года по окрайкам до 13617 ± 190 лет в центральной части болота (Карпенко, Прокушкин, 2018). Глубина торфа характеризуется широким диапазоном – от 1.6 до 5.1 м, с увеличением от краев к центру болота. Состав древостоя – 10С. Древесный ярус представлен болотными формами сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* f. *litwinowii*) (Park et al., 2021). Средняя высота деревьев на участке наблюдений – 2.5 м. В структуре живого напочвенного покрова представлены багульник болотный, голубика обыкновенная (*Vaccinium uliginosum* L.), хамедафне обыкновенная (*Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench), сфагновые мхи (*Sphagnum* spp.) (90 %), лишайники рода кладония (*Cladonia* spp.) (5 %).

Приборный комплекс ЭКС состоит из инфракрасных газоанализаторов (ИКГА) закрытого типа LI-7200/7200RS (LI-COR Inc., США), а также обогреваемых ультразвуковых анемометров модели METEK USA-1 (METEK GmbH, Германия), установленных на высоте 30 и 10 м в сосняке лишайниковом и сосновом ряме соответственно (Park et al., 2021; Куричева и др., 2023). Круглогодичные измерения ЧЭО проводятся методом турбулентных пульсаций (Burba, 2013; Куричева и др., 2023). Статистическая обработка первичных данных осуществлялась посредством специализированного программного обеспечения EddyPro® (LI-COR Inc., США) с применением общепринятых методических подходов, изложенных в работе G. Burba (2013).

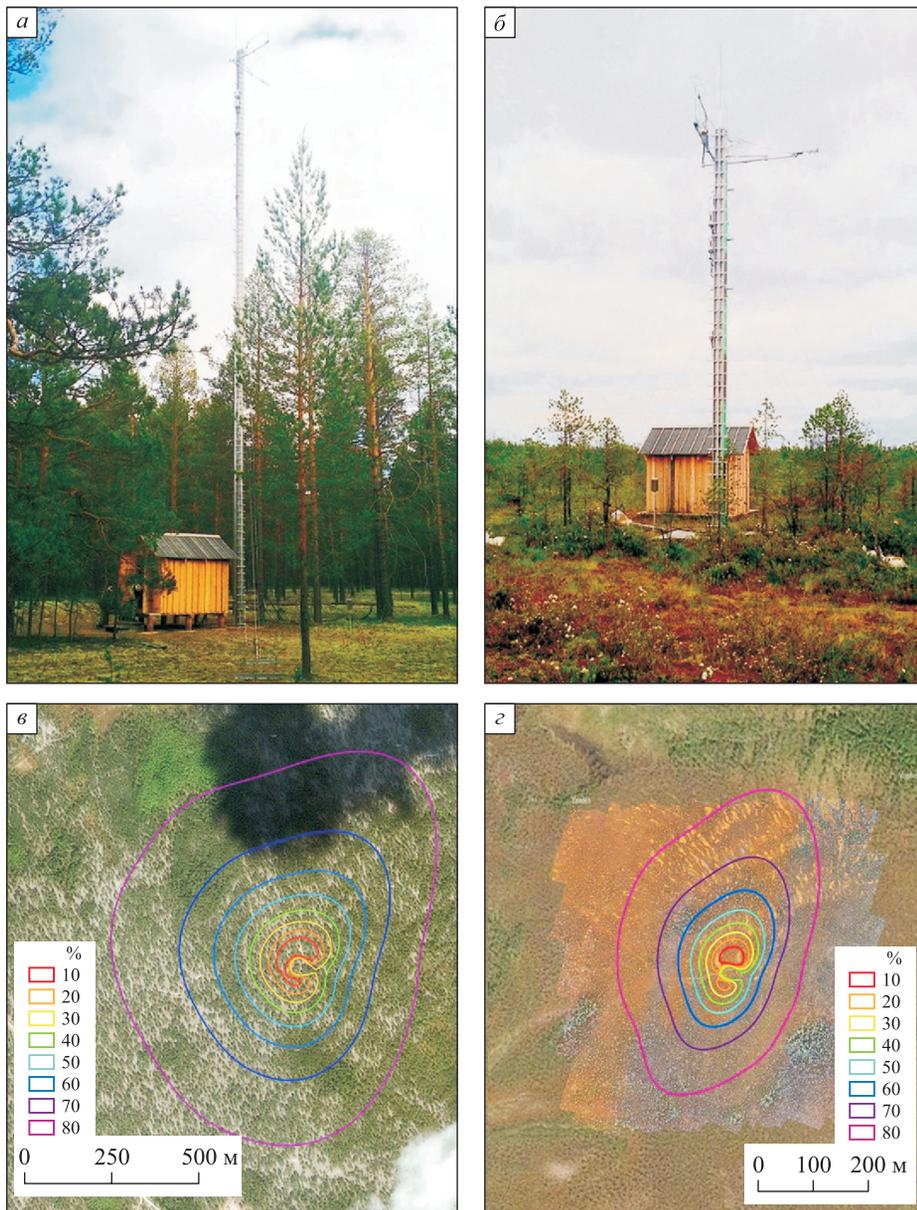


Рис. 3. Эколого-климатические станции (ЭКС) на репрезентативных тестовых участках в сосняке лишайниковом (а) и сосновом ряме (б), с футпринтами (80 %) для данных ЭКС (в, з) соответственно.

Эмиссионные потоки CO_2 с поверхности почвы измеряли при помощи ИКГА-модели LI 8100A (LI-COR Inc., США) с использованием камеры 8100-103 Survey Chamber (LI-COR Inc., США) в дневное время, в период с 11:00 до 16:00. Измерения проводились на регулярной основе с 2012 г., в безморозный период – с июня по сентябрь включительно (Махныкина и др., 2016). В зимний сезон наблюдения носили эпизодический характер. Чистый почвенный обмен CO_2 (Net Soil Exchange; NSE) определяли с 2020 г. с помощью ИКГА-модели LI 8100A (LI-COR Inc., США) и прозрачной камеры (8100-104C Clear Long-Term Chamber). Измерения эмиссионных

потоков CO_2 сопровождалась замерах температуры почвы на глубинах 5, 10 и 15 см с помощью почвенного температурного датчика Soil Temperature Probe Type E (Omega Engineering Inc., США) и объемной влажности почвы на глубине 5 см с использованием влагомера модели Theta Probe Model ML (Delta T Devices Ltd., Великобритания).

Определение показаний фотосинтетической ассимиляции углерода для абсолютных доминантов подчиненного яруса растительности проводилось на участках сосняка зеленомошного (10С), лишайникового (10С) и смешанного леса (5БЗС2Ос + П) как производном

после нарушения (рубки) (Koshurnikova et al., 2015a). Объекты исследования были представлены видами вечнозеленых (брусника обыкновенная, багульник болотный) и листопадных (голубика обыкновенная, черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.), водяника черная (*Empetrum nigrum* L.), линнея северная (*Linnaea borealis* L.)) кустарничков, а также перьевыми мхами (плевроциум Шребера, гилокомиум блестящий (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.), дикранум метловидный (*Dicranum scoparium* (Hedw.)) и лишайниками (кладонии звездчатая и оленья, цетрария исландская (*Cetraria islandica* (L.) Ach.)) (Polosukhina et al., 2020). Фотосинтетическую активность регистрировали с помощью портативной системы газообмена Walz GFS-3000 (Heinz Walz GmbH, Германия) со специализированной кюветой для высших растений и лишайников/мохов модели 3010-V32. Сезонные измерения фотосинтеза для каждого вида проводили параллельно с оценкой влияния абиотических факторов (ФАР, температура воздуха, концентрация CO₂ в атмосферном воздухе) (Polosukhina et al., 2020, 2023).

Для мониторинга латеральных потоков углерода в районе исследований были созданы стационарные посты долговременных наблюдений на водотоках второго порядка – ручьях Развилки и Горбатый, относящихся к бассейну р. Дубчес (левый приток р. Енисей). Ручьи дренируют соответственно преимущественно олиготрофный (грядово-мочажинные комплексы и ямы) и эвтрофный болотные массивы. Пост на руч. Развилки оборудован автоматическими логгерами-регистраторами уровня воды НОВО U20L-04 (Onset Computer Corp., США), удельной электропроводности НОВО U24 (Onset Computer Corp., США), растворенного диоксида углерода GMT222 (Vaisala, Финляндия) и мультипараметрическим зондом модели EXO2 (YSI Corp., США) с сенсорами флуоресцентного органического вещества (fDOM), pH, ОВП и УЭП. Регулярный отбор проб осуществляется также на р. Хойба (река четвертого порядка).

На стационарных постах регулярный отбор воды руслового стока осуществлялся с 2012 г. в период открытой воды (май – сентябрь) каждые 3–10 дней и ежемесячно в зимний (октябрь – апрель) период. Образцы воды фильтровались непосредственно после отбора (GF/F, Whatman) и хранились при 2 °С до проведения лабораторных анализов. Содержание РОУ и РНУ определялось с помощью анализатора TOC vario cube (Elementar, Германия). Спектраль-

ные (например, SUVA) свойства растворенного органического углерода получены с помощью УФ-вид спектрофотометра Cary 100 (Agilent, США). Эмиссионные потоки CO₂ измерялись методом плавающей камеры высотой 10 см, оборудованной ИК-сенсором GMT222 (Vaisala, Финляндия), помещенным в насос GM70PUMP (Vaisala, Финляндия) (Serikova et al., 2018), параллельно с отбором проб воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика концентрации климатически активных газов. Концентрация CO₂ в ПСА в районе обсерватории ZOTTO за многолетний период наблюдений (2009–2020 гг.) демонстрирует сезонный ход с минимальными значениями в летние периоды и максимумами зимой (рис. 4, а).

Снижение уровня атмосферного CO₂ начинается в апреле, что обусловлено запуском процессов фотосинтеза в более южных районах зоны охвата высотной мачты и достигает минимальных значений в конце июля – начале августа, периоде наибольшей вегетационной активности наземных экосистем на территории всей области футпринта.

В сравнении с более северными территориями бассейна р. Енисей (эстуарная зона) в период с 2019 по 2020 г. летний минимум CO₂ в среднетаежной подзоне, с учетом влияния и более южных областей футпринта, достигает ~ 45 дней, с первых чисел июля до середины августа (рис. 4, в), тогда как в при одноклиматических условиях полярного пояса Сибири он не превышает ~ 10 дней и сдвинут на более поздние сроки (первая декада июля), что обусловлено существенной разницей физиологической активности растительного покрова и в продолжительности периодов вегетации (Панов и др., 2022; Panov et al., 2022a, b). С августа в районе обсерватории ZOTTO отмечается возрастание доли вклада эмиссионного потока и его превалирование над процессами фотосинтетической ассимиляции углерода атмосферы растительным покровом, что приводит к росту содержания CO₂. Пиковых значений концентрация диоксида углерода в атмосфере достигает в декабре-январе. При этом весь период наблюдений характеризуется устойчивым приростом концентрации атмосферного CO₂ на уровне 2.5 млн⁻¹/год (~0.6 % в год от глобального уровня в атмосфере).

В отличие от CO₂, сезонный ход CH₄ в районе исследований (рис. 4, б) менее выражен, но в

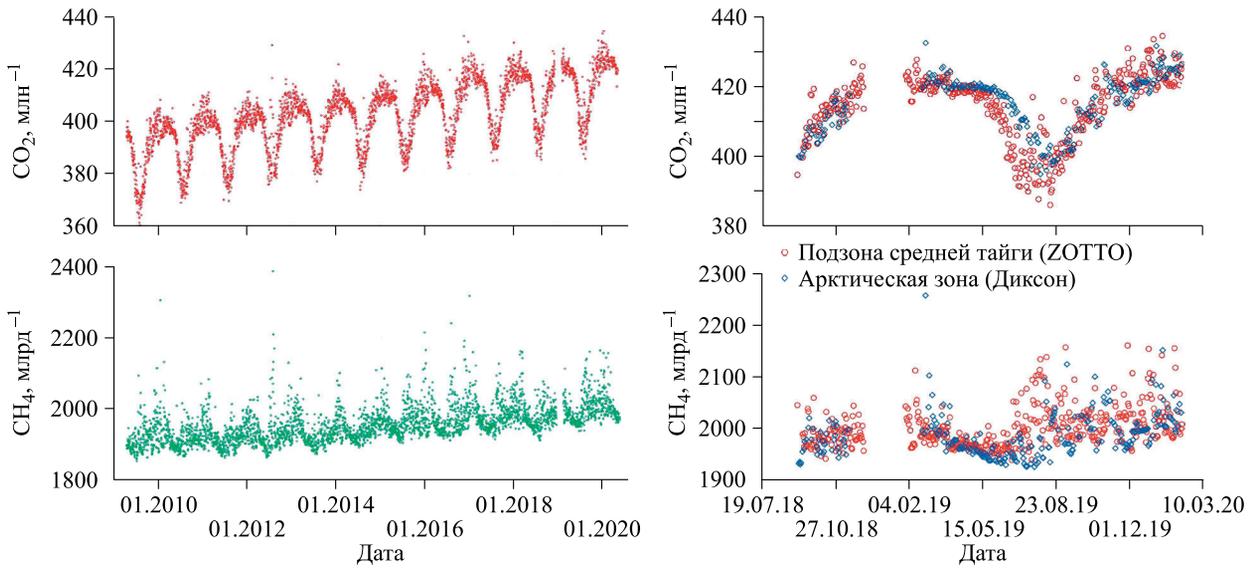


Рис. 4. Сезонный ход концентрации CO_2 (а) и CH_4 (б) в атмосфере среднетаежной подзоны Центральной Сибири за 10-летний период измерений (04.2009–04.2020 гг.) и сравнение сезонной динамики концентрации CO_2 (в) и CH_4 (г) в подзоне средней тайги (обсерватория ZOTTO) и эстуарной зоне р. Енисей (ст. DIAMIS, г. п. Диксон (Панов и др., 2022; Panov et al., 2022a, b)) за период 09.2018–02.2020 гг.

нем прослеживаются два максимума – в летний (август) и зимний (январь-февраль) периоды (Тимохина и др., 2018; Timokhina et al., 2018). Концентрация метана летом увеличивается с середины июня вместе с прогреванием почвы, что обуславливает возрастание активности метаногенных микроорганизмов, и достигает максимальных значений в августе в связи с активными процессами выделения CH_4 болотными экосистемами Западной Сибири. Это подтверждается и сравнением летних значений мольных фракций метана в атмосфере средней полосы Центральной Сибири с эстуарной зоной р. Енисей в 2019–2020 гг. (рис. 4, г), которое демонстрирует более выраженный летний минимум CH_4 в природно-климатических условиях полярного пояса (~ 1902 млрд $^{-1}$), тогда как в атмосфере района исследований (обсерватория ZOTTO) минимальный уровень метана выше (~ 1940 млрд $^{-1}$ /год) (Панов и др., 2022; Panov et al., 2022a), что обусловлено его эмиссией из болотных экосистем. Вместе с тем среднегодовой уровень CH_4 в районе исследований ниже в сравнении с районами Западной Сибири, что связано со снижением площади заболоченных территорий в направлении с запада на восток (Тимохина и др., 2018; Timokhina et al., 2018). С середины осени (октябрь) сезонный ход CH_4 в районе исследований демонстрирует рост его концентрации вплоть до достижения максимальных значений в январе-феврале. За период наблюдений отмечен прирост содержания метана в атмосфере на

уровне 9 млрд $^{-1}$ /год ($\sim 0.4\%$ в год от глобального уровня в атмосфере). Следует также отметить, что на базе обсерватории ZOTTO проводятся работы по сопоставлению данных газового режима атмосферы с продуктами спутникового мониторинга гелиогеофизического назначения (данные отечественного космического аппарата «Метеор-М» № 2) для валидации оценок общего содержания CO_2 над территорией РФ (Голомолзин и др., 2022; Golomolzin et al., 2022).

Обменные потоки CO_2 в экосистемах среднетаежной подзоны Центральной Сибири. Ретроспективные оценки показателей нетто-обмена CO_2 в ключевых экосистемах среднетаежной подзоны Центральной Сибири, полученные в ходе измерений на ЭКС с 1996 по 2004 г., представлены в таблице. В целом все биогеоценозы подзоны средней тайги в течение вегетационного сезона (апрель – сентябрь) выступали стоком атмосферного диоксида углерода, варьируя от 29 до 269.9 г $\text{C}/(\text{m}^2 \cdot \text{сезон})$ (см. таблицу).

Актуализированные значения ЧЭО, полученные в период наблюдений с 2012 по 2022 г., по данным функционирующих в районе исследований ЭКС, также свидетельствуют, что экосистемы выступали в качестве стока атмосферного CO_2 (пределы варьирования: 86–253 г $\text{C}/(\text{m}^2 \cdot \text{сезон})$).

Вместе с тем показатели поглощения CO_2 биогеоценозами характеризуются существенной межгодовой изменчивостью, обусловленной динамикой метеоклиматических условий.

Чистый экосистемный обмен CO₂ в экосистемах Средней Сибири за период инструментальных наблюдений 1996–2004 гг.

Биогеоценоз	Координаты, с. ш. / в. д.	Годы	ЧЭО, г С/(м ² · сезон)	Источник
Березняк	61°01' / 89°34'	2000	–247	Röser et al., 2002
Смешанный лес	61°01' / 89°34'	2000	–99.7	Röser et al., 2002
Пихтарник	61°01' / 89°34'	2000	–269.9	Röser et al., 2002
Сосняк лишайниковый	60°44' / 89°09'	1996–1997	–168.0	Schulze et al., 1999
Сфагновое болото	–	1996–1997	–60.0	Schulze et al., 1999
Сосняк лишайниковый (200 лет)	60°45' / 89°23'	1999–2000	–145.2 ... –163.2	Lloyd et al., 2002
Сфагновое болото	60°45' / 89°23'	1998–2000	–52.0 ... –62.6 –29.0 (год)	Arneeth et al., 2002; Чебакова и др., 2014

За период круглогодичных измерений с 2013 по 2022 г. сосняк лишайниковый был источником диоксида углерода в зимнее время (~0.24 ... 0.26 г С/(м² · сут)) и стоком CO₂ атмосферы в безморозный период года (–1.32 ... –1.50 г С/(м² · сут)). Переход экосистемы из источника CO₂ атмосферы в его сток отмечался, как правило, во второй декаде мая, обратный переход – в конце сентября – первой декаде октября. На протяжении вегетационного периода скорость ЧЭО в экосистеме возрастала пропорционально росту температуры воздуха, с достижением пиковых значений (–3.4 ... –3.9 г С/(м² · сут)) в конце июня – начале июля.

На участке соснового яра за период круглогодичных наблюдений с 2013 по 2022 г. среднесуточное значение ЧЭО в холодное время года (октябрь – третья декада апреля) достигало ~ 0.36–0.40 г С/(м² · сут). Переход экосистемы из состояния источника CO₂ в атмосферу к его поглощению наблюдался в конце мая (~ 10 дней позднее участка в сосновом лесу), обратный переход происходил в третьей декаде сентября – начале октября. В период вегетационного сезона среднее значение суточного нетто-обмена составляло –1.2 ... –1.6 г С/(м² · сут). Максимальные значения (–2.8 ... –3.2 г С/(м² · сут)) отмечались в конце июня – начале июля.

Сезонные показатели фотоассимиляционных потоков в экосистемах среднетаежной подзоны Центральной Сибири. Фотосинтетическая активность кустарничкового яруса растительности находится в пределах 130–380 мг CO₂/(м² · ч). При этом прослеживается четкий сезонный ход с максимумом в июле, а наибольший вклад вносят листопадные кустарнички – голубика обыкновенная (35 %) и багульник болотный (27 %). Сезонная фотоассимиляция CO₂ у голубики обыкновенной изменяется от 42.8 ± 0.3 мг CO₂/(м² · ч) (25 % от

суммарной величины) в июне до 59.4 ± 0.8 мг CO₂/(м² · ч) (46 %) в августе, а у багульника болотного варьирует от 59.7 ± 0.9 мг CO₂/(м² · ч) (34 %) в июне до 30.3 ± 1.0 мг CO₂/(м² · ч) (23 %) в августе.

В сосняках поглощение атмосферного CO₂ в моховых синузиях в течение вегетационного сезона варьирует в дневные часы от 140 до 180 мг CO₂/(м² · ч) (рис. 5, а). Доминирующую роль по количеству поглощаемого атмосферного CO₂ играет мох плевроциум Шребера. Фотоассимиляционный поток CO₂ на его синузиях может варьировать от 89.1 ± 0.1 мг CO₂/(м² · ч) (61 % от суммарной величины) в июне до 99.1 ± 0.1 мг CO₂/(м² · ч) (55 %) в августе (рис. 5, а).

Поглощение CO₂ атмосферы в лишайниковых синузиях существенно ниже, что, вероятно, обусловлено меньшим содержанием фотосинтетических пигментов в талломах лишайников (в 4–10 раз) по сравнению с высшими растениями, однако сезонная динамика поглотительной способности более выражена: от 40 до 70 мг CO₂/(м² · ч) в июне и августе соответственно (рис. 5, б).

За исключением начала вегетационного сезона (июнь), кладония звездчатая вносит наибольший вклад в фотоассимиляцию CO₂ лишайниковым покровом (рис. 5, б), варьируя в диапазоне от 12.2 ± 0.2 мг CO₂/(м² · ч) (31 %) в июне до 33.4 ± 0.2 мг CO₂/(м² · ч) в августе (46 %).

Эмиссионные потоки CO₂ в экосистемах среднетаежной подзоны Центральной Сибири. Годовой ход почвенной эмиссии CO₂ на исследованных тестовых участках в экосистемах средней тайги имеет, как правило, типичный для биогеоценозов бореальной зоны вид. Низкие скорости наблюдаются в зимний период, максимальные потоки приходятся на конец июля – начало августа, что в большинстве случаев обусловлено ходом температуры почвы и ее

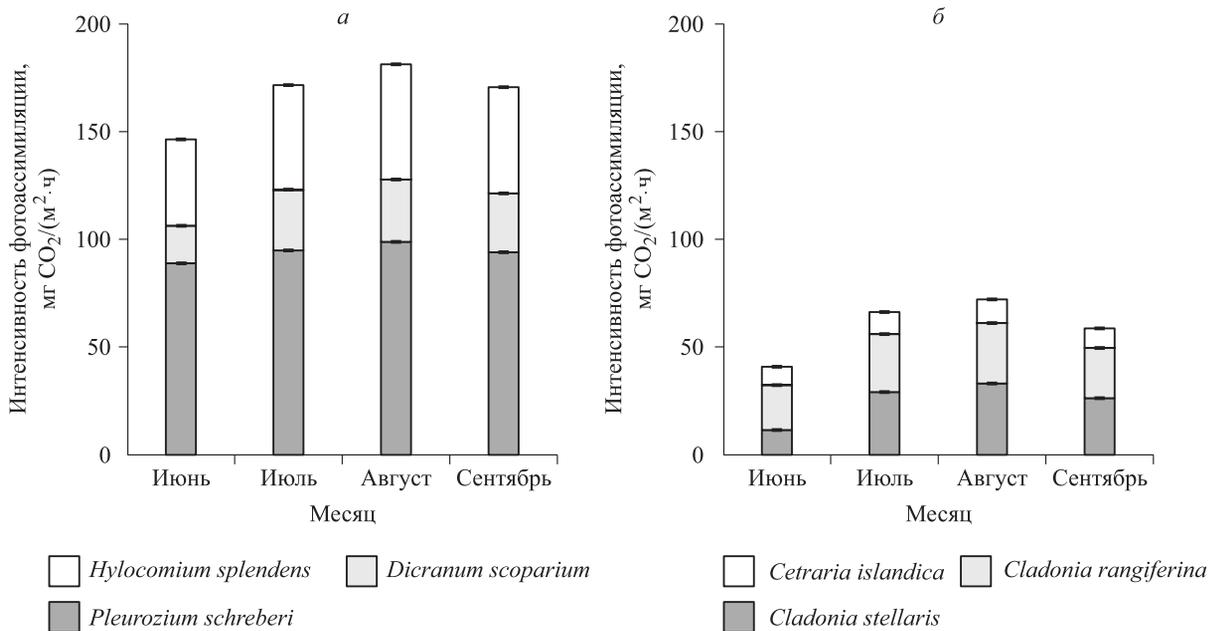


Рис. 5. Сезонная динамика фотосинтетической активности на примере доминантов мхов (а) и лишайников (б) в сосняках среднетаежной подзоны.

влиянием на активность авто- и гетеротрофного звена биогеоценозов. Согласно полученным оценкам (Панов и др. 2021; Panov et al., 2021), зимние потоки для ключевых биогеоценозов в районе исследований в среднем составляют 0.9 ± 0.4 $\text{мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, варьируя от 0.6 до 1.2 $\text{мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Максимальные потоки – в зимний сезон наблюдались в сосняке зеленомошном, минимальные – в сосново-березовом насаждении разнотравного типа леса. Исходя из ранее полученных результатов (Shibistova et al., 2002), в период схода снега (первая декада мая) эмиссия CO_2 с поверхности почвы в среднем может повышаться еще на 0.5 $\text{мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

Основные динамические изменения интенсивности почвенной эмиссии приходятся на безморозный период. Установлено, что лесорастительные условия и нарушенность территории оказывают существенное влияние на эмиссионный поток CO_2 с поверхности почвы (рис. 6). Так, на нарушенном участке вариации сезонного хода почвенной эмиссии минимальны (1.1 ± 0.1 $\text{мкмоль CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), а абсолютные значения в среднем в 8 раз ниже, чем на лесопокрываемых участках (Махныкина и др., 2020; Makhnykina et al., 2020). Среди лесных участков минимальными величинами усредненного за сезон эмиссионного потока CO_2 характеризовались площадки в сосняке лишайниковом и зеленомошном, составляя 3.0 ± 1.7 и 3.7 ± 1.6 $\text{мкмоль CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, соответственно. Максимальные потоки CO_2 с поверхности почвы отмечены на те-

стовом участке в смешанном лесу, где средние потоки CO_2 за сезон значимо ($P < 0.01$) отличались от других участков наблюдений и достигали 7.0 ± 1.2 $\text{мкмоль CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Установлено, что условия увлажнения оказывают существенное влияние на кумулятивный эмиссионный поток CO_2 за сезон, а влияние типа леса проявлялось только во влажные годы. Так, в засушливый сезон наблюдался спад эмиссионного потока CO_2 в среднем на 35–42 % в сравнении с сезонами, характеризующимися достаточным количеством осадков. Для сосняка лишайникового отмечено, что сильные дожди могут обуславливать резкие спорадические всплески CO_2 в атмосферу, что, в зависимости от погодных условий конкретного сезона, может вносить существенный (до 40 %) вклад в кумулятивный эмиссионный поток с поверхности почвы (Makhnykina et al., 2024).

Насаждения в районе исследований характеризуются значительной нарушенностью пожарами и вырубками (Koshurnikova et al., 2015b), а преобладающие сосняки лишайниковой и зеленомошной групп типов леса характеризуются высокой природной пожарной опасностью (Иванова, Иванов, 2015). Для оценки трансформации компонентов углеродного обмена после нарушений проведено исследование интенсивности эмиссионного потока CO_2 с поверхности почвы на участках в сосняке лишайниковом на разных стадиях послепожарной сукцессии (рис. 7).

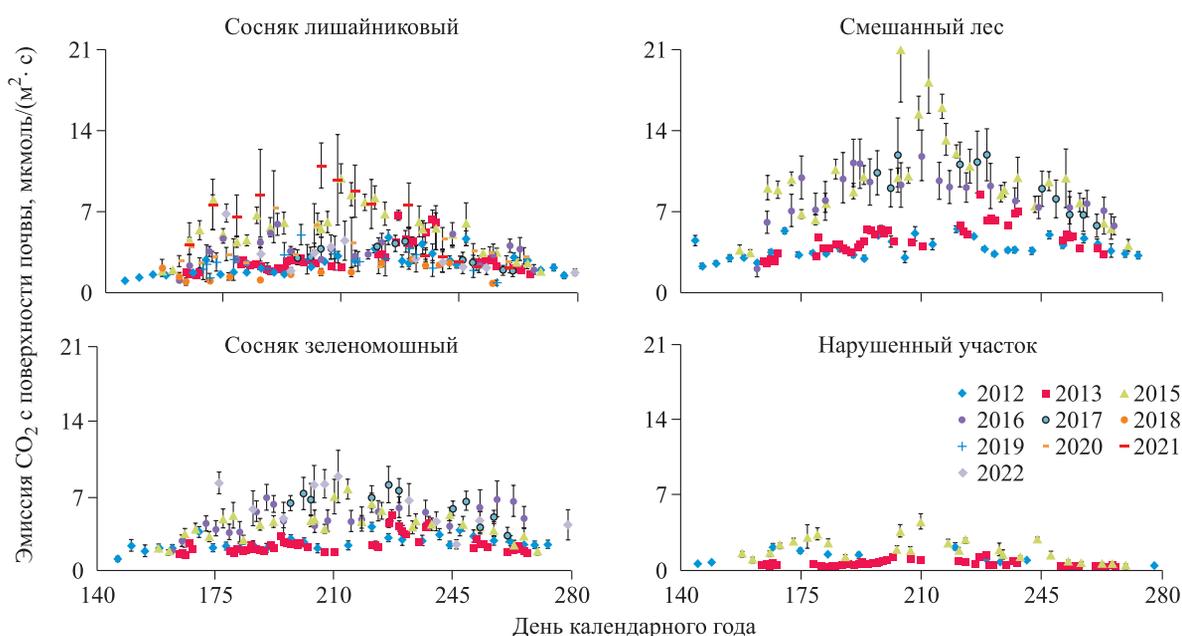


Рис. 6. Сезонный ход эмиссионного потока CO_2 с поверхности почвы в различных типах леса и на нарушенном участке в среднетаежной подзоне Центральной Сибири за период инструментальных измерений (2013–2022 гг.). Приведены средние значения со стандартными ошибками ($n = 5$).

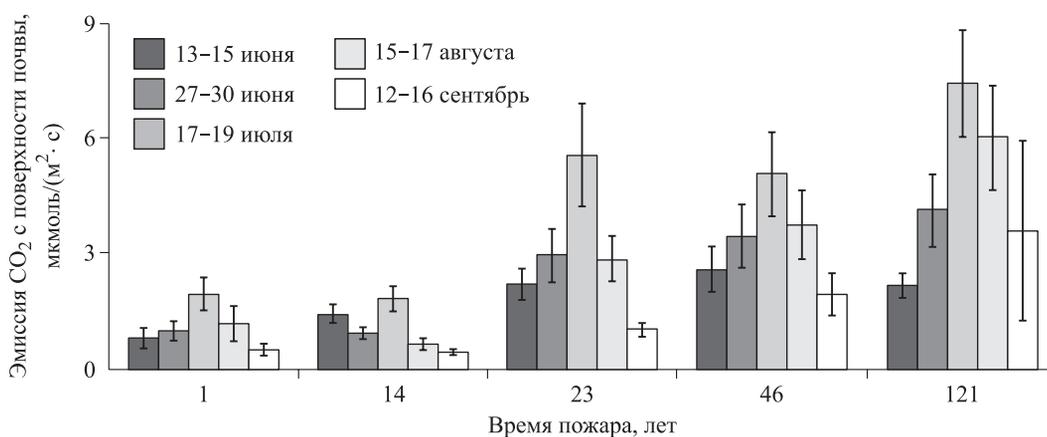


Рис. 7. Сезонный ход эмиссионного потока CO_2 с поверхности почвы в сосняке лишайниковом среднетаежной подзоны Центральной Сибири на разных стадиях послепожарной сукцессии.

Установлено, что на свежей гари эмиссионный поток был в 4 раза ниже в сравнении с ненарушенным насаждением (Makhnykina et al., 2023). При этом наблюдаемые значения потока на гаях (до 15 лет после пожара) были сопоставимы с показателями эмиссии CO_2 на участке после сплошной рубки (7 лет после рубки), разница между ними не превышала 5–10 %. Спустя ~ 20 лет после пожара наблюдается восстановление скорости эмиссионного потока, до значений, характерных для ненарушенных сосновых насаждений. Отмечено, что ключевым абиотическим фактором, определяющим почвенную эмиссию CO_2 , выступала температура почвы,

а на ранних стадиях послепожарного восстановления – влажность почвы.

Для уточнения роли параметров климата и лесорастительных условий в трансформации баланса углерода нарушенных экосистем с 2022 г. в сосняке лишайниковом на четырех участках, характеризующихся различной степенью нарушения (ненарушенное насаждение; насаждение, пройденное пожаром; вырубка; вырубка, пройденная пожаром), размещены системы круглогодичного автоматического мониторинга метеорологических условий и проводятся сезонные измерения эмиссионных потоков CO_2 (рис. 8).

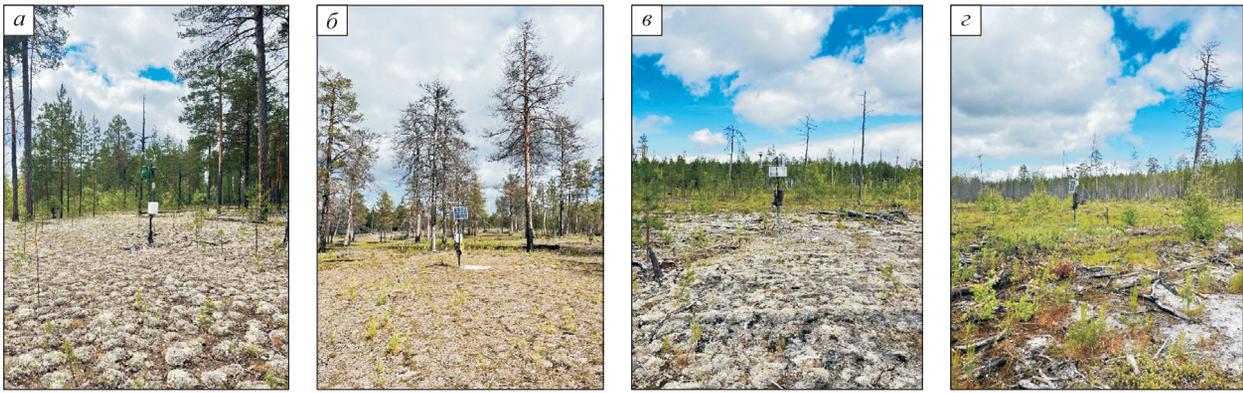


Рис. 8. Системы круглогодичного автоматического мониторинга метеорологических условий в ненарушенном насаждении (а), насаждении, пройденном пожаром (б), вырубке (в), вырубке, пройденной пожаром (з).

Кроме того, мониторинговые системы установлены на трех участках в чистых сосновых молодняках разной густоты, сформировавшихся на вырубке.

Мониторинг латеральных потоков углерода в районе исследований. На основе многолетнего мониторинга вод выявлены общие закономерности поведения растворенных форм углерода в водах ручьев, дренирующих преимущественно олиготрофный (грядово-мочажинные комплексы и рямы) и эвтрофный болотные массивы. На примере руч. Развилки показана среднесезонная (2012–2022 гг.) динамика концентраций растворенного органического углерода (РОУ) и растворенного неорганического углерода РНУ: минимальные значения РОУ характерны для зимней межени (около 3 мг С/л) и максимальные – периодам весеннего половодья (май-июнь) и при повышенном стоке в сентябре (около 13 мг С/л) (рис. 9).

Обратная закономерность характерна поведению РНУ при варьировании от 1.5 до 4.5 мг С/л. Среднегодовое значение этих форм углерода в руч. Развилки составило 12.6 и 0.6 мг С/л соответственно. Ручей Горбатый, дренирующий эвтрофный болотный массив, характеризуется более низкими концентрациями РОУ (среднегодовое значение 8.8 мг С/л) и повышенными уровнями РНУ (7.6 мг С/л). Степень ароматизации в сравниваемых ручьях также отлична: руч. Развилки характеризуется значениями $SUVA 3.91 \pm 0.35$, а руч. Горбатый – 2.69 ± 0.16 л/(м · мг С). Данный факт свидетельствует о значительно более высокой доле аллохтонного (терригенного) углерода, поступающего из олиготрофных болот, и, наоборот, преобладание автохтонного органического вещества в стоке ручьев, дренирующих болота эвтрофного ряда.

Более детальная картина временной изменчивости концентраций растворенных форм угле-

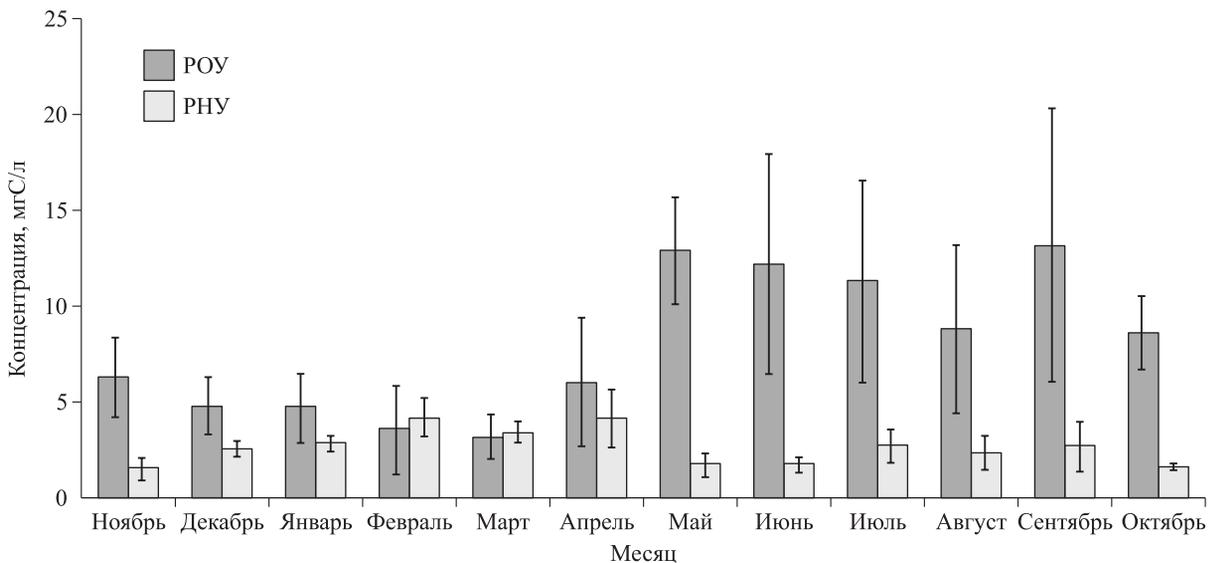


Рис. 9. Среднемесячные концентрации РОУ и РНУ в водах руч. Развилки за 2012–2022 гг.

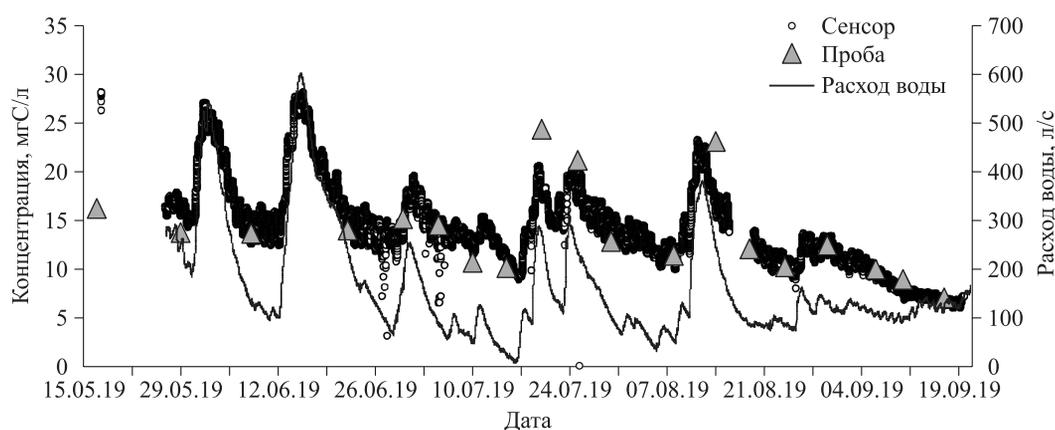


Рис. 10. Расход воды и концентрации РОУ в руч. Развилки, полученные с 10-минутным интервалом с помощью сенсора fDOM EXO2, и измеренные в пробах, отобранных с частотой в 5–7 дней (на примере 2019 г.).

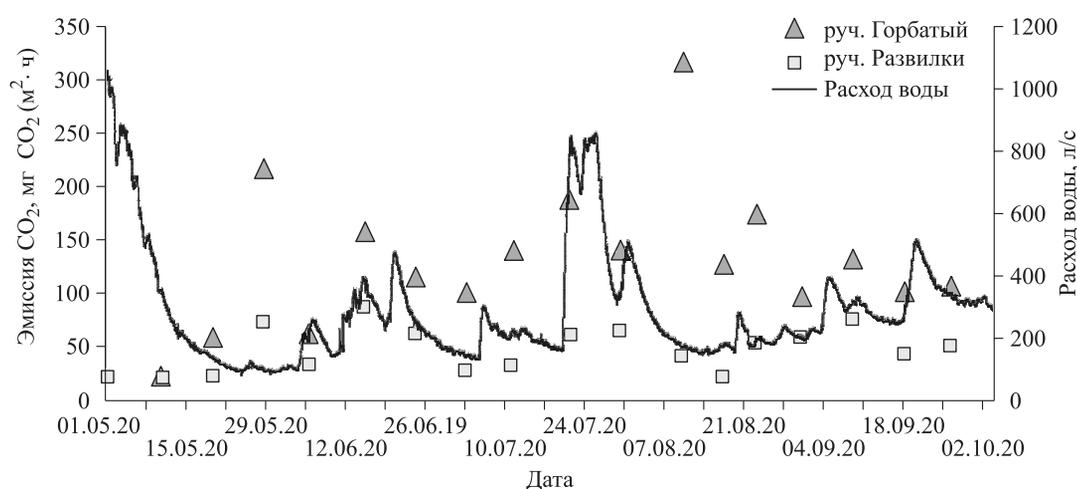


Рис. 11. Расходы воды и эмиссии CO_2 с водной поверхности ручьев Развилки и Горбатый в 2020 г., полученные с помощью плавающей камеры.

рода и эмиссий CO_2 с водной поверхности может быть получена с помощью автоматических регистраторов. В период открытой воды концентрация РОУ (сенсор fDOM зонда EXO2) характеризуется существенными флуктуациями (10–27 мг C/л) с достаточно тесной корреляцией ($R = 0.75, p < 0.05$) с расходами воды ручья (рис. 10).

Эмиссионные потоки CO_2 с поверхности водного зеркала варьируют в руч. Развилки в пределах 200–860 мг $\text{CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{сут})$, а в руч. Горбатый – от 215 до 3100 мг $\text{CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{сут})$ (рис. 11).

Повышенные эмиссии CO_2 , как правило, отмечены при паводковых режимах в летний период. В весеннее половодье, несмотря на значительные концентрации РОУ и высокие значения расходов воды, эмиссии CO_2 относительно низки и не превышают 200 мг $\text{CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{сут})$. Следует подчеркнуть, что ручьи, дренирующие преимущественно олиготрофные болотные мас-

сивы (грядово-мочажинные комплексы и рямы), характеризуются близкими или меньшими уровнями эмиссий по сравнению с сосновыми и болотными экосистемами их водосборных бассейнов (2–6 мкмоль $\text{CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{с})$).

Для ручья, дренирующего эвтрофный болотный массив, эмиссионный поток соответствует почвенным эмиссиям в смешанных лесах (2–20 мкмоль $\text{CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{с})$) с большей продуктивностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существует целый ряд документальных свидетельств происходящих изменений баланса углерода и трансформации природной среды на климатически уязвимых территориях высоких широт. Из всех лесных регионов планеты наибольшие изменения ожидаются в бореальных (северных) районах Евразии – здесь они про-

являются в первую очередь и с наибольшими амплитудами, затрагивая целый спектр природных объектов и сред в системе «атмосфера – растительность – почва – гидросфера». Газовый состав атмосферы в данной связке особенно информативен, выступая своеобразным интегратором процессов, определяющих текущие компенсационные способности биосферы. Именно на изучение динамики атмосферы и ее неразрывной связи с наземными природными и водными объектами и климатом направлены работы уникальной мониторинговой платформы – обсерватории ZOTTO (Средне-Енисейского ОЭП ИЛ СО РАН). Многие годы обсерватория служит мультидисциплинарной научной площадкой для реализации широкого спектра мониторинговых и экспериментальных исследований окружающей среды и ее динамики.

В ходе многолетних квазинепрерывных исследований на базе обсерватории установлено, что в фоновых природно-климатических условиях Центральной Сибири наблюдается ежегодный прирост концентрации CO_2 на уровне $2.5 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$ ($\sim 0.6\%$ в год от глобального уровня в атмосфере) и $\text{CH}_4 - 9 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$ ($\sim 0.4\%$ в год соответственно), что в целом соответствует общемировому тренду увеличения ПГ в атмосфере. Анализ нетто-обмена CO_2 между ключевыми биогеоценозами подзоны средней тайги и атмосферой свидетельствует, что биогеоценозы, как правило, выступают в качестве стока (поглотителя) атмосферного CO_2 . Вместе с тем поглощение CO_2 биогеоценозами характеризуется значительной межгодовой изменчивостью, обусловленной динамикой метеоклиматических условий. При этом отмечен существенный вклад фотосинтетической ассимиляции подчиненных ярусов растительности в поглощение CO_2 .

Итоги многолетнего мониторинга эмиссии CO_2 с поверхности почвы на лесных участках свидетельствуют, что наименьшими показателями эмиссии характеризуются сосняки лишайниковые и зеленомошные, а максимальными – смешанный лес. Вместе с тем лесорастительные условия и степень нарушенности территории оказывают существенное влияние на почвенный эмиссионный поток CO_2 в атмосферу.

По результатам оценки латеральных потоков С в районе исследований, отмечена значительно более высокая доля аллохтонного (терригенного) углерода, поступающего из олиготрофных болот, а в стоке ручьев, дренирующих болота эвтрофного ряда, выявлено преобладание автотонного органического вещества.

Продолжение и дальнейшее развитие исследований на базе обсерватории позволит отследить динамику разнонаправленных изменений углероддепонирующего потенциала наземных экосистем, дать прогнозные оценки отклика УДП на флуктуации погодных условий, структурно-функциональное состояние растительного покрова и изменения параметров окружающей среды применительно к физико-географическим, растительным и климатическим условиям Сибири.

Исследования на базе обсерватории ZOTTO (Средне-Енисейского ОЭП ИЛ СО РАН) выполнены в рамках проектов государственного задания № FWES-2024-0040 и № FWES-2024-0023, финансовой поддержки Общества Макса Планка (Германия) и реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6). Исследования газового режима атмосферы на станции DIAMIS (г. п. Диксон) в эстуарной зоне р. Енисей выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 24-27-20064.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А. В. Растительность Западной Сибири и ее картографирование. М.: Наука, 1984. 121 с.
- Голомолзин В. В., Рублев А. Н., Киселева Ю. В., Козлов Д. А., Прокушкин А. С., Панов А. В. Определение общего содержания диоксида углерода над территорией России по данным отечественного космического аппарата «Метеор-М» № 2 // Метеорол. и гидрол. 2022. № 4. С. 79–95.
- Иванова Г. А., Иванов А. В. Пожары в сосновых лесах Средней Сибири. Новосибирск: Наука, 2015. 240 с.
- Карпенко Л. В., Прокушкин А. С. Генезис и история послеледникового развития лесного болота в долине р. Дубчес // Сиб. лесн. журн. 2018. № 5. С. 33–44.
- Куричева О. А., Авиллов В. К., Варлагин А. В., Гитарский М. Л., Дмитриченко А. А., Дюкарев Е. А., Загирова С. В., Замолодчиков Д. Г., Зырянов В. И., Карелин Д. В., Карсанаев С. В., Курганова И. Н., Лапина Е. Д., Максимов А. П., Максимов Т. Х., Мамкин В. В., Марунич А. С., Мигловец М. Н., Михайлов О. А., Панов А. В., Прокушкин А. С., Сиденко Н. В., Шилкин А. В., Курбатова Ю. А. Мониторинг экосис-

- темных потоков парниковых газов на территории России: сеть RUFLEX // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 4. С. 512–535.
- Махныкина А. В., Прокушкин А. С., Ваганов Е. А., Верховец С. В., Рубцов А. В. Динамика потоков CO₂ с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири // Журн. СФУ. Сер. «Биол.» 2016. Т. 9. № 3. С. 338–357.
- Махныкина А. В., Прокушкин А. С., Меняйло О. В., Верховец С. В., Тычков И. И., Урбан А. В., Рубцов А. В., Кошурникова Н. Н., Ваганов Е. А. Влияние климатических факторов на эмиссию CO₂ из почв в среднетаежных лесах Центральной Сибири: эмиссия как функция температуры и влажности почвы // Экология. 2020. № 1. С. 48–58.
- Панов А. В., Прокушкин А. С., Зражевская Г. К., Урбан А. В., Зырянов В. И., Сиденко Н. В., Хайманн М. Зимнее почвенное дыхание в экосистемах Средней Сибири: сравнительные оценки с использованием трех методов измерений // Экология. 2021. № 2. С. 112–122.
- Панов А. В., Прокушкин А. С., Кюблер К., Корец М. А., Урбан А. В., Зражевская Г. К., Бондарь М. Г., Хайманн М., Заале З. Прецизионный мониторинг концентрации диоксида углерода и метана в приземной атмосфере полярного пояса Приенисейской Сибири // Метеорол. и гидрол. 2022. № 11. С. 19–31.
- Тимохина А. В., Прокушкин А. С., Панов А. В., Колосов Р. А., Сиденко Н. В., Лаврич Й., Хайманн М. Межгодовая изменчивость концентрации диоксида углерода над центральной частью Сибири (по данным международной обсерватории ZOTTO за 2009–2015 гг.) // Метеорол. и гидрол. 2018. № 5. С. 20–29.
- Урбан А. В., Прокушкин А. С., Корец М. А., Панов А. В., Гербиб К., Хайманн М. Влияние подстилающей поверхности на концентрации парниковых газов в Центральной Сибири // Геогр. природ. рес. 2019. № 3. С. 32–40.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г. Углеродный бюджет лесов России // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 69–92.
- 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. Энерго и массообмен и продуктивность основных экосистем Сибири (по результатам измерений методом турбулентных пульсаций) 2. Углеродный обмен и продуктивность // Изв. РАН. Сер. биол. 2014. № 1. С. 65–75.
- Arneith A., Kurbatova J., Kolle O., Shibistova O. B., Lloyd J., Vygodskaya N. N., Schulze E.-D. Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and a central Siberian bog II. Inter-seasonal and interannual variability of CO₂ fluxes // Tellus B: Chem. Phys. Meteorol. 2002. V. 54. Iss. 5. P. 514–530.
- Bonan G. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests // Science. 2008. V. 320. N. 5882. P. 1444–1449.
- Burba G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. Lincoln, NE, USA: LI-COR Biosciences, 2013. 331 p.
- Dolman A. J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., Molen M. K. van der, Beletti Marchesini L., Maximov T. C., Maksyutov S., Schulze E.-D. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods // Biogeosciences. 2012. V. 9. N. 12. P. 5323–5340.
- Drake T. W., Raymond P. A., Spencer R. G. M. Terrestrial carbon inputs to inland waters: a current synthesis of estimates and uncertainty // Limnol. Oceanogr. Lett. 2018. V. 3. Iss. 3. P. 132–142.
- Дымов А. А., Гроднитская И. Д., Яковлева Е. В., Дубровский Ю. А., Кутявин И. Н., Старцев В. В., Милановский Е. Ю., Прокушкин А. С. Albic podzols of boreal pine forests of Russia: Soil organic matter, physicochemical and microbiological properties across pyrogenic history // Forests. 2022. V. 13. Iss. 11. Article 1831.
- Frey K. E., Smith L. C. Amplified carbon release from vast West Siberian peatlands by 2100 // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. Iss. 9. Article 022025.
- Golomolzin V. V., Rublev A. N., Kiseleva Yu. V., Kozlov D. A., Prokushkin A. S., Panov A. V. Retrieval of total column carbon dioxide over Russia from Meteor-M No. 2 satellite data // Rus. Meteorol. Hydrol. 2022. V. 47. N. 4. P. 304–314 (Original Rus. Text © V. V. Golomolzin, A. N. Rublev, Yu. V. Kiseleva, D. A. Kozlov, A. S. Prokushkin, A. V. Panov, 2022, publ. in Meteorologiya i Gidrologiya. 2022. N. 4. P. 79–95).
- Hayes D. J., Kicklighter D. W., McGuire A. D., Chen M., Zhuang Q., Yuan F., Melillo J. M., Wullschlegel S. D. The impacts of recent permafrost thaw on land-atmosphere greenhouse gas exchange // Environ. Res. Lett. 2014. V. 9. N. 4. P. 1–12.
- Heimann M. The EUROSIBERIAN CARBONFLUX project // Tellus B: Chem. Phys. Meteorol. 2002. V. 54. Iss. 5. P. 417–419.
- Heintzenberg J., Birmili W., Otto R., Andreae M. O., Mayer J.-C., Chi X., Panov A. Aerosol particle number size distributions and particulate light absorption at the ZOTTO tall tower (Siberia), 2006–2009 // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. N. 1. P. 8703–8719.
- Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J. W., Schuur E. A. G., Ping C.-L., Schirmermeister L., Grosse G., Michaelson G. J., Koven C. D., O'Donnell J. A., Elberling B., Mishra U., Camill P., Yu Z., Palmtag J., Kuhry P. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // Biogeosciences. 2014. V. 11. N. 23. P. 6573–6593.
- Karlsson J., Serikova S., Vorobyev S. N., Rocher-Ros G., Denfeld B., Pokrovsky O. Carbon emission from Western Siberian inland waters // Nat. Comm. 2021. V. 12. Iss. 1. Article 825.
- Kljun N., Calanca P., Rotach M. W., Schmid H. P. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP) // Geosci. Model Dev. 2015. V. 8. P. 3695–3713.
- Koshurnikova N. N., Verkhovets S. V., Antamoshkina O. A., Trofimova N. V., Zlenko L. V., Zhuikov A. V., Garmash A. A. Structure of the organic matter pool in *Pinus sibirica* dominated forests of Central Siberia // Folia For. Pol. Ser. A. 2015a. V. 57. N. 4. P. 218–223.
- Koshurnikova N. N., Verkhovets S. V., Antamoshkina O. A., Trofimova N. V., Zlenko L. V., Zhuikov A. V. Assessment of Central Siberia forest ecosystems sustainability to forest fires: academic research outcomes // Proc. Soc. Behav. Sci. 2015b. V. 214. P. 1008–1018.

- Lloyd J., Shibistova O., Zolotoukhine D., Kolle O., Arneth A., Wirth C., Styles J. M., Tchebakova N. M., Schulze E.-D. Seasonal and annual variations in the photosynthetic productivity and carbon balance of a central Siberian pine forest // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2002. V. 54. Iss. 5. P. 590–610.
- Makhnykina A. V., Prokushkin A. S., Menyaylo O. V., Verkhovets S. V., Tychkov I. I., Urban A. V., Rubtsov A. V., Koshurnikova N. N., Vaganov E. A. The impact of climatic factors on CO₂ emissions from soils of middle-taiga forests in central Siberia: Emission as a function of soil temperature and moisture // *Rus. J. Ecol.* 2020. V. 51. N. 1. P. 46–56 (Original Rus. Text © A. V. Makhnykina, A. S. Prokushkin, O. V. Menyaylo, S. V. Verkhovets, I. I. Tychkov, A. V. Urban, A. V. Rubtsov, N. N. Koshurnikova, E. A. Vaganov, 2020, publ. in *Ekologiya*. 2020. N. 1. P. 48–58).
- Makhnykina A. V., Panov A. V., Prokushkin A. S. The impact of wildfires on soil CO₂ emission in middle taiga forests in Central Siberia // *Land*. 2023. V. 12. Iss. 8. Article 1544.
- Makhnykina A. V., Vaganov E. A., Panov A. V., Koshurnikova N. N., Prokushkin A. S. The pulses of soil CO₂ emission in response to rainfall events in Central Siberia: revisiting the overall frost-free season CO₂ flux // *Forests*. 2024. V. 15. N. 2. Article 355.
- McGuire A. D., Anderson L. G., Christensen T. R., Dallimore S., Guo L., Hayes D. J., Heimann M., Lorensen T. D., Macdonald R. W., Roulet N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change // *Ecol. Monogr.* 2009. V. 79. N. 4. P. 523–555.
- McGuire A. D., Christensen T. R., Hayes D., Heroult A., Euskirchen E., Kimball J. S., Koven C., Lafleur P., Miller P. A., Oechel W., Peylin P., Williams M., Yi Y. An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: Comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions // *Biogeosciences*. 2012. V. 9. N. 8. P. 3185–3204.
- Panov A. V., Prokushkin A. S., Zrazhevskaya G. K., Urban A. V., Zyryanov V. I., Sidenko N. V., Heimann M. Winter CO₂ fluxes in ecosystems of Central Siberia: comparative estimates using three different approaches // *Rus. J. Ecol.* 2021. V. 52. N. 2. P. 126–135 (Original Rus. Text © A. V. Panov, A. S. Prokushkin, G. K. Zrazhevskaya, A. V. Urban, V. I. Zyryanov, N. V. Sidenko, M. Heimann, 2021, publ. in *Ekologiya*. 2021. N. 2. P. 112–122).
- Panov A. V., Prokushkin A. S., Kubler K., Korets M. A., Urban A. V., Zrazhevskaya G. K., Bondar' M. G., Heimann M., Zaehle S. Precise observations of atmospheric carbon dioxide and methane mole fractions in the polar belt of Near-Yenisei Siberia // *Rus. Meteorol. Hydrol.* 2022. V. 47. N. 11. P. 829–838 (Original Rus. Text © A. V. Panov, A. S. Prokushkin, K. Kubler, M. A. Korets, A. V. Urban, G. K. Zrazhevskaya, M. G. Bondar', M. Heimann, S. Zaehle, 2022, publ. in *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2022a. N. 11. P. 19–31).
- Panov A., Prokushkin A., Semiletov I., Kubler K., Korets M., Putilin I., Urban A., Bondar M., Heimann M. Atmospheric CO₂ and CH₄ fluctuations over the continent-sea interface in the Yenisei River sector of the Kara Sea // *Atmosphere*. 2022b. V. 13. Iss. 9. Article 1402.
- Park S.-B., Knohl A., Migliavacca M., Thum T., Vesala T., Peltola O., Mammarella I., Prokushkin A., Kolle O., Lavrič J., Park S. S., Heimann M. Temperature control of spring CO₂ fluxes at a coniferous forest and a peat bog in central Siberia // *Atmosphere*. 2021. V. 12. Iss. 8. Article 0984.
- Polosukhina D. A., Prokushkin A. S., Masyagina O. V. Carbon photoassimilation by dominant species of mosses and lichens in pine forests of Central Siberia // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2020. N. 11. Article 012031.
- Polosukhina D. A., Makhnykina A. V., Aryasov V. E., Trusov D. V., Prokushkin A. S. Photosynthesis of widespread lichen species in pine forests of Central Siberia // *Lesovedenie (For. Sci.)*. 2023. N. 6. P. 690–696.
- Reum F., Gerbig C., Lavric J. V., Rella C. W., Göckede M. Correcting atmospheric CO₂ and CH₄ mole fractions obtained with Picarro analyzers for sensitivity of cavity pressure to water vapor // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. N. 2. P. 1013–1027.
- Richter-Menge J., Druckenmiller M. L., Jeffries M. Arctic report card: Update for 2019. 2019. <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019>
- Romanovsky V. E., Schaefer K., Turetsky M. R., Treat C. C., Vonk J. E. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. V. 520. P. 171–179.
- Röser C., Montagnani L., Schulze E.-D., Mollicone D., Kolle O., Meroni M., Papale D., Beletti Marchesini L., Federici S., Valentini R. Net CO₂ exchange rates in three different successional stages of the “Dark Taiga” of central Siberia // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2002. V. 54. Iss. 5. P. 642–654.
- Schulze E.-D., Lloyd J., Kelliher F. M., Wirth C., Rebmann C., Lühker B., Mund M., Knohl A., Milyukova I. M., Schulze W., Ziegler W., Varlagin A. V., Sogachev A. F., Valentini R., Dore S., Grigoriev S., Kolle O., Panforyov M. I., Tchebakova N., Vygodskaya N. N. Productivity of forests in the Eurosiberian boreal region and their potential to act as a carbon sink – a synthesis // *Global Change Biol.* 1999. V. 5. Iss. 6. P. 703–722.
- Schulze E. D., Prokushkin A. S., Arneth A., Knorre N., Vaganov E. A. Net ecosystem productivity and peat accumulation in a Siberian Aapa mire // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2002. V. 54. Iss. 5. P. 531–536.
- Schuur E. A. G., McGuire A. D., Schadel C., Grosse G., Harden J. W., Hayes D. J., Hugelius G., Koven C. D., Kuhry P., Lawrence D. M., Natali S. M., Olefeldt D., Romanovsky V. E., Schaefer K., Turetsky M. R., Treat C. C., Vonk J. E. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. V. 520. P. 171–179.
- Serikova S., Pokrovsky O. S., Ala-Aho P., Kazantsev V., Kirpotin S. N., Kopysov S. G., Krickov I. V., Laudon H., Manasyrov R. M., Shirokova L. S., Soulsby C., Tetzlaff D., Karlsson J. High riverine CO₂ emissions at the permafrost boundary of Western Siberia // *Nat. Geosci.* 2018. V. 11. P. 825–829.
- Shibistova O., Lloyd J., Evgrafova S., Savushkina N., Zrazhevskaya G., Arneth A., Knohl A., Kolle O., Schulze E.-D. Seasonal and spatial variability in soil CO₂ efflux rates for a central Siberian *Pinus sylvestris* forest // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2002. V. 54. Iss. 5. P. 552–567.
- Tchebakova N. M., Kolle O., Zolotoukhine D., Arneth A., Styles J. M., Vygodskaya N. N., Schulze E.-D., Shibistova O., Lloyd J. Inter-annual and seasonal variations of energy and water vapour fluxes above a *Pinus sylvestris* forest in the Siberian middle taiga // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2002. V. 54. Iss. 5. P. 537–551.

- Timokhina A. V., Prokushkin A. S., Panov A. V., Kolosov R. A., Sidenko N. V., Lavrich J., Heimann M. Interannual variability of atmospheric CO₂ concentrations over central Siberia from ZOTTO data for 2009–2015 // *Rus. Meteorol. Hydrol.* 2018. V. 43. Iss. 5. P. 288–294 (Original Rus. Text © A. V. Timokhina, A. S. Prokushkin, A. V. Panov, R. A. Kolosov, N. V. Sidenko, J. Lavric, M. Heimann, 2018, publ. in *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2018. N. 5. P. 20–29).
- Urban A. V., Prokushkin A. S., Korets M. A., Panov A. V., Gerbig K., Heimann M. Influence of the underlying surface on greenhouse gas concentrations in the atmosphere over Central Siberia // *Geogr. Nat. Res.* 2019. V. 40. Iss. 3. P. 221–229 (Original Rus. Text © A. V. Urban, A. S. Prokushkin, M. A. Korets, A. V. Panov, K. Gerbig, M. Heimann, 2019, publ. in *Geogr. i prirod. res.* 2019. V. 40. N. 3. P. 32–40).
- Winderlich J., Chen H., Gerbig C., Seifert T., Kolle O., Lavric J. V., Kaiser C., Hofer A., Heimann M. Continuous low-maintenance CO₂/CH₄/H₂O measurements at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia // *Atmos. Meas. Tech.* 2010. V. 3. N. 4. P. 1113–1128.

CARBON FLOWS IN THE ECOSYSTEMS OF THE MIDDLE TAIGA OF CENTRAL SIBERIA

A. V. Panov¹, A. V. Makhnykina^{1,2}, A. V. Urban¹, V. I. Zyryanov¹, D. A. Polosukhina^{1,2}, E. A. Kukavskaya¹, V. E. Aryasov¹, R. A. Kolosov¹, I. R. Putilin¹, P. D. Tretyakov¹, D. A. Trusov¹, R. T. Sadykov¹, A. S. Prokushkin^{1,2}

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

² Siberian Federal University

Prospekt Svobodnyy, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

E-mail: alexey.v.panov@gmail.com

The observed increase in temperature, caused by increasing concentrations of climate-active (greenhouse) gases in the atmosphere, primarily carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄), may be responsible for the projected release of carbon accumulated over millennia in large areas of northern latitudes. The scale and duration of the expected effect remains an open question, due to the sporadic nature of quantitative estimates of carbon flows. The work reflects the current status, directions and main results of long-term instrumental studies of carbon flows in the ecosystems of the middle taiga subzone of Central Siberia, on the basis of the Middle Yenisei experimental station of V. N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ZOTTO observatory). The dynamics of CO₂ and CH₄ concentrations in the atmosphere from 2009 to 2020 are presented. The values of net ecosystem exchange of CO₂ for forest-swamp complexes are given, indicating that they act as a sink (sink) of atmospheric CO₂. For representative ecosystems, an assessment of soil CO₂ emission fluxes and the seasonal variation in the values of photosynthetic carbon assimilation by dominants of the subordinate vegetation layer are presented. The patterns of behavior of dissolved forms of carbon in the waters of streams draining oligotrophic and eutrophic swamps in the study area were revealed, and the values of CO₂ emission from the water surface were presented.

Keywords: atmosphere, climate, carbon dioxide, methane, carbon exchange flows.

How to cite: Panov A. V., Makhnykina A. V., Urban A. V., Zyryanov V. I., Polosukhina D. A., Kukavskaya E. A., Aryasov V. E., Kolosov R. A., Putilin I. R., Tretyakov P. D., Trusov D. A., Sadykov R. T., Prokushkin A. S. Carbon flows in the ecosystems of the middle taiga of Central Siberia // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 37–53 (in Russian with English abstract and references).