

ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

УДК 574.4

МОНИТОРИНГ ЭКОСИСТЕМНЫХ ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ
НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ: СЕТЬ RUFLUX

© 2023 г. О. А. Куричева^{a, *}, В. К. Авилов^a, А. В. Варлагин^{a, **}, М. Л. Гитарский^b,
А. А. Дмитриченко^c, Е. А. Дюкарев^{c, d, ***}, С. В. Загирова^{e, ****}, Д. Г. Замолотчиков^{f, g, *****},
В. И. Зырянов^h, Д. В. Карелин^{i, *****}, С. В. Карсанаев^j, И. Н. Курганова^{k, *****},
Е. Д. Лапшина^c, А. П. Максимов^j, Т. Х. Максимов^{j, *****}, В. В. Мамкин^{a, g, *****},
А. С. Марунин^l, М. Н. Мигловец^e, О. А. Михайлов^e, А. В. Панов^h, А. С. Прокушкин^{h, *****},
Н. В. Сиденко^h, А. В. Шилкин^{f, m}, Ю. А. Курбатова^{a, *****}

^aИнститут проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

^bРоссийское энергетическое агентство, Москва, Россия

^cЮгорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

^dИнститут мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

^eИнститут биологии Коми научного центра УО РАН, Сыктывкар, Россия

^fЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

^gНациональный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

^hИнститут леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

ⁱИнститут географии РАН, Москва, Россия

^jИнститут биологических проблем криолитозоны СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ ЯНЦ СО РАН,
Якутск, Россия

^kИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия

^lВалдайский филиал Государственного гидрологического института, Валдай, Россия

^mНПО Тайфун, Обнинск, Россия

*e-mail: olga.alek.de@gmail.com

**e-mail: varlagin@sevin.ru

***e-mail: dekot@mail.ru

****e-mail: zagirova@ib.komisc.ru

*****e-mail: dzamolod@cepl.rssi.ru

*****e-mail: dkarelin7@gmail.com

*****e-mail: ikurg@mail.ru

*****e-mail: tcmx@mail.ru

*****e-mail: vadimmamkin@gmail.com

*****e-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru

*****e-mail: kurbatova.j@gmail.com

Поступила в редакцию 03.12.2022 г.

После доработки 29.03.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Впервые дается обобщенная информация по истории формирования, состоянию наблюдений и основным научным результатам региональных сетей и станций, включенных в RuFlux — общероссийскую систему мониторинга экосистемных потоков парниковых газов (ПГ). Измерения проводятся по мировым стандартам методом турбулентных пульсаций (eddy covariance method), обеспечивающим сопоставимые оценки потоков ПГ на пространственном уровне отдельных экосистем. Получены многолетние (более 190 станций-лет наблюдений) ряды потоков ПГ. По состоянию на осень 2022 г. 86% станций сети RuFlux расположено в лесных и болотных экосистемах, 77% всех станций — в средней и южной тайге. Почти все ненарушенные экосистемы России являются стоками CO₂ из атмосферы с диапазоном средних годовых оценок нетто-поглощения от 80 до 240 г С/(м² год). Баланс ПГ определяется комплексом абиотических и биотических факторов. Среднее многолетнее нетто-поглощение CO₂ выше в мерзлотных лиственничниках Сибири, чем в ельниках Европейской территории России, несмотря на краткость вегетационного сезона (менее 4 мес. у лиственничников и более 6 мес. у ельников). При движении с запада на восток интенсивность стока CO₂ в середине лета увеличивается, а эмиссия CO₂ в середине зимы резко снижается. Природные и антропогенные на-

рушения приводят к трансформации углеродного баланса за счет увеличения выделения CO_2 в атмосферу. В целом, сеть RuFlux охватывает широкий спектр климатических условий и типов экосистем, но для повышения ее репрезентативности по всей территории России требуется создание станций, работающих по методу турбулентных пульсаций, в тундровых, северо-таежных, лесостепных, степных и полупустынных экосистемах. Также нужна организация мониторинга ПГ в антропогенно-измененных экосистемах (в том числе агроценозах) и в экосистемах с сукцессиями, вызванными природными нарушениями.

Ключевые слова: метод турбулентных пульсаций, экосистемы, чистый экосистемный обмен, сеть измерений, эколого-климатические станции

DOI: 10.31857/S2587556623040052, **EDN:** СТГОНО

ВВЕДЕНИЕ

Биогеохимические и биогеофизические процессы, определяющие обмен энергией и веществом между наземными экосистемами и атмосферой, в последние годы все чаще рассматриваются в контексте оценки климаторегулирующих функций экосистем. Развитие инструментальной базы метеорологических наблюдений, средств регистрации, хранения и обработки больших массивов данных позволило научному сообществу в 1990-е годы создать новый инструмент для количественной оценки энергообмена и потоков ПГ между экосистемами и атмосферой — эколого-климатические станции (ЭКС). На встрече исследователей в Ла-Туиле (Италия) в 1995 г. (Baldocchi et. al., 1996^{*1}) были представлены первые результаты длительных непрерывных наблюдений за чистым экосистемным обменом CO_2 (баланс CO_2 с атмосферой или нетто-обмен CO_2 ; в англоязычной литературе — net ecosystem exchange, или *NEE*) на основе МТП. Прямые оценки баланса CO_2 экосистем вызвали одобрение у научного сообщества и энтузиазм для развития сетей станций на территории Европы, США, Японии и Юго-Восточной Азии. Единый методический подход к оценке потоков энергии и вещества дал возможность развивать региональные сети, которые были объединены в единую мировую сеть станций FLUXNET при поддержке NASA (США) в 1997 г. Основная цель развития сети наблюдений состояла в интеграции данных наземных измерений и дистанционного зондирования Земли (приборов MODIS). В настоящее время доступная база данных FLUXNET² включает результаты наблюдений более 1000 станций, которые работали ранее или на которых продолжают наблюдения в настоящее время. Многолетние исследования позволили оценить пространственно-временную измен-

чивость потоков CO_2 , влаги и энергии в зависимости от абиотических и биотических факторов для всех биомов мира (Baldocchi, 2020). Для масштабирования потоков энерго- и массообмена, а также для создания прогнозов используются математические модели. Данные наблюдений за потоками ПГ, влаги и энергии востребованы как входные данные, а также основа для параметризаций и валидации моделей. Мировая сеть станций является непрерывно развивающимся инструментом для решения широкого круга экологических задач.

На территории России сеть станций мониторинга экосистемных потоков ПГ начала развиваться одновременно с развитием национальных и региональных сетей в мире. По нашим оценкам на основе данных, приведенных в научной печати и открытых интернет-ресурсах³, в последние два десятилетия на территории нашей страны в разные периоды велись исследования на 35 станциях. Как правило, многолетние наблюдения на основе МТП были начаты в рамках международных проектов и частично были завершены по их окончании (Vygodskaya et al., 2002*).

В то же время некоторые научные коллективы в РФ отдали предпочтение МТП как основному инструменту получения экспериментальных данных о потоках CO_2 на экосистемном пространственном уровне. В соответствии с собственными научными целями коллективы развивали локальные или региональные сети станций. Исторически на территории России сложились следующие сети: в Красноярском крае (KrasFlux), в Республике Саха (Якутия) (SakhaFluxNet), в Тверской области, в Республике Коми и в Ханты-Мансийском АО. Многолетние исследования проводятся в Новгородской области. Эти станции стали основой для создания в 2022 г. общероссийской сети мониторинга экосистемных потоков ПГ RuFlux. Национальная сеть создана в рамках Важнейшего инновационного проекта государственного значения Научно-образовательный центр “Углерод в экосистемах: мониторинг” (далее — ВИП ГЗ). Всего

¹ Здесь и далее “*” отмечены литературные источники, которые вынесены в Расширенный список литературы (ДМ_1; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: СТГОНО).

² <https://fluxnet.org/sites/site-list-and-pages/> (дата обращения 13.11.2022).

³ <https://cosima.nceas.ucsb.edu/carbon-flux-sites/> (дата обращения 13.11.2022).

в 2022 г. в сеть мониторинга экосистемных потоков ПГ вошли 22 станции, из них 18 станций семи научных коллективов вели мониторинг ПГ в 2010-х — начале 2020-х годов. В рамках ВИП ГЗ планируется организация наблюдений в Московской, Курской областях, расширение сетей наблюдений в Красноярском крае и Ханты-Мансийском АО.

Данные ряда российских ЭКС входят в базу FLUXNET. На лесных станциях в Тверской области и в Центральной Якутии получены непрерывные ряды наблюдений за потоками тепла, H_2O и CO_2 длительностью более 20 лет — одни из самых продолжительных в мире. Результаты таких длительных наблюдений являются крайне востребованными в мировом научном сообществе и регулярно используются при составлении глобальных оценок экосистемных потоков ПГ, калибровке спутниковых измерений и математических моделей, изучении факторов пространственного и временного распределения потоков ПГ (Besnard et al., 2018*; Delwiche et al., 2021*; Johnston et al., 2021*). Ряды длиной более 20 лет позволяют уловить тенденции масштабных изменений экосистем, и дальнейшее продолжение мониторинговых исследований позволит давать обоснованные прогнозы изменений углеродного баланса.

Лесам уделяется повышенное внимание в оценках баланса ПГ, так как 90% поглощения углерода на территории России приходится именно на них (Dolman et al., 2012). В соответствии с категориями земель МГЭИК, по данным Росреестра, леса в 2020 г. составляли 52% территории России, водно-болотные угодья — 13% (Романовская и др., 2022b*). Оценки площадей лесов и болот сильно варьируют в зависимости от точного определения типов поверхности. Так, по оценкам, сделанным с использованием данных дистанционного зондирования (Щепашенко и др., 2015*), леса составляют 42% территории России; по оценкам Вомперского и др. (2011*), болота вместе с мелкоотторфованными заболоченными землями составляют более 20% площади страны. Нетто-поглощение CO_2 в лесах России (сток CO_2 из атмосферы в экосистемы) за 2001–2019 гг. составляло около четверти от поглощения во всех лесах мира (Harris et al., 2021*). Поглощение CO_2 в лесах России перекрывает значительную часть выбросов CO_2 от сжигания ископаемого топлива и от промышленной деятельности. Сток CO_2 в лесах России больше, чем в любой другой стране мира; в Канаде, следующей за Россией, сток CO_2 слабее в полтора раза (Harris et al., 2021*). В то же время при оценках баланса ПГ территорий необходимо учитывать природные и антропогенные нарушения лесных экосистем, особенно лесные пожары и рубки, а также нашествия насекомых, которые могут значительно снижать сток CO_2 в леса (Исаев и др., 1995*; Rödenbeck et al., 2003*). Эффективная система монито-

ринга климатически активных газов на территории РФ требует тщательного учета потоков ПГ в разных типах лесов, в том числе находящихся в зоне деградирующей многолетней мерзлоты.

Покрытие территории России станциями наблюдений потоков ПГ значительно меньше, чем в ЕС, США и Китае. На Россию приходится 60% площади арктических и таежных экосистем мира, при этом количество полученных месячных значений *NEE* в базе данных для этих экосистем ABCflux (Virkkala et al., 2022*) на всех российских станциях в сумме составляет только 16% от количества месячных значений на станциях в тундровой и таежной зонах Северного полушария. Количество публикаций и цитирований с 1990 по 2022 г. в журналах, индексируемых в базе данных WoS, по ключевым словам, “Net ecosystem exchange” (7307 результатов) и “Net ecosystem exchange + Siberia, Net ecosystem exchange + Russia, Eddy covariance + Russia” (40, 33 и 52 результата) показывает, что их количество по России даже в последние годы составляет не более 1% мирового количества публикаций и цитирований по этой теме.

Оценки баланса углекислого газа всех природных экосистем России на сегодняшний день различаются почти на порядок. Так, разброс оценок, полученных разными авторами в 2010-х годах, составляет от 172 до 1400 млн т С в год (Филипчук и др., 2020*). И хотя данные станций, использующих МТП, не входят в международную климатическую отчетность, они используются для площадных оценок баланса ПГ на территории разных стран и являются дополнительным инструментом для верификации оценок на уровне страны. Так, А. Долман с соавторами (Dolman et al., 2012) по данным 14 станций наблюдений, использующих МТП, оценили нетто-поглощение углекислого газа в природных экосистемах России в 2009 г. в 342 млн т С в год, что в 2 раза больше модельных оценок Национального доклада о кадастре РФ (Романовская и др., 2022a*). Полученная оценка баланса С на территории России (Dolman et al., 2012) базируется на данных, полученных лишь на 14 станциях наблюдений, поэтому она является в значительной мере экспертной. Для ее верификации необходимо расширение и дальнейшее развитие национальной сети RuFlux.

В XXI в. прогнозируются значительные изменения баланса углерода природных экосистем, в первую очередь в связи с современными изменениями климата (IPCC, 2021*). В среднем по России повышение среднегодовой температуры воздуха (*T*) в 1976–2018 гг. составило 2.0°C (Доклад ..., 2019*), и такое значительное потепление, безусловно, может сильно влиять на потоки тепла и ПГ в экосистемах различных климатических зон. Одним из основных преимуществ исследований с помощью ЭКС является возможность детально отслежи-

вать, как экосистема в целом реагирует на факторы среды, такие как свет, T , осадки (P), влажность почвы, концентрация CO_2 , элементы питания (Baldocchi, 2020). Длительные наблюдения позволяют дать оценки будущих изменений баланса ПГ экосистем при климатических изменениях, а также в результате природных и антропогенных нарушений.

Целью данной работы является описание развития сети, состояния наблюдений, а также анализ результатов, полученных на региональных сетях и станциях, включенных в RuFlux — национальную систему мониторинга ПГ в природных экосистемах. Задачами работы являются оценка репрезентативности сети; обобщение сумм NEE за год и вегетационные сезоны; оценка межгодовой изменчивости и многолетних трендов NEE ; сравнение сезонного хода NEE на станциях с разными климатическими условиями; описание влияния факторов среды на NEE , а также описание возможностей прогнозирования и площадных оценок углеродного баланса с помощью данных станций RuFlux.

МЕТОД ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

Для оценки потоков и баланса ПГ в наземных экосистемах используется линейка методов (в порядке увеличения пространственных масштабов исследований): камерные измерения, учет биомассы на пробных площадях и учет углерода в почве, метод турбулентных пульсаций, метод высотных (атмосферных) мачт, спутниковые наблюдения. Единственный прямой метод, позволяющий оценить поток CO_2 на уровне экосистемы (от 100×100 до 1000×1000 м) с высоким временным разрешением — метод турбулентных пульсаций (МТП). МТП позволяет рассчитать, сколько граммов вещества (например, CO_2) переместилось с единичной площади (квадратный метр) экосистемы в атмосферу или из атмосферы в экосистему. МТП в настоящее время является одним из наиболее точных и теоретически обоснованных методов определения потоков энергии и вещества между экосистемами и атмосферой (Бурба и др., 2016; Курбатова, Ольчев, 2017*; Baldocchi, 2020; Baldocchi et al., 1988*; Burba, 2022*; Eddy ..., 2012; Foken, 2008*).

Теоретическая основа метода базируется на теории турбулентности Колмогорова–Обухова, которая описывает мелкомасштабную структуру пульсаций в полях T и скорости турбулентного переноса в атмосфере (Монин, Яглом; 1965*; Montgomery, 1948*; Obukhov, 1951*; Swinbank, 1951*). Вертикальный турбулентный поток ПГ рассчитывается как ковариация (осредненное произведение пульсаций) вертикальной компоненты скорости ветра (w) и концентрации исследуемого газа (c) (Бурба и др., 2016). Так как основной для расчета потока являются пульсации (мгновенные отклонения от средних значений), МТП также называют пульсационным методом.

Инструментальные наблюдения, организованные в соответствии с теоретическими основами МТП, позволяют осуществлять автоматический непрерывный мониторинг потоков ПГ (CO_2 , CH_4 , H_2O и др.) и энергии. Первичные измерения основных параметров МТП — скорости ветра по трем пространственным осям и концентраций исследуемых газов — ведутся с частотой 50–100 Гц. Регистрация данных требует высокоточных и малоинерционных приборов: трехмерных ультразвуковых анемометров и инфракрасных газоанализаторов. Параллельно осуществляются актинометрические, метеорологические и биометрические автоматические наблюдения с частотой от 1 с до 1 мин, которые позволяют интерпретировать оценки потоков газов, полученные на основе МТП. Системы пульсационных и дополнительных измерений объединяют в единый программно-аппаратный комплекс — ЭКС (рис. 1).

С помощью ЭКС круглосуточно и круглогодично либо в течение вегетационного сезона регистрируются потоки ПГ и метеорологические параметры. Дальнейшая обработка данных (расчет потоков, ввод поправок, контроль качества, фильтрация данных, заполнение пропусков) проводится с помощью специального программного обеспечения. Расчет потоков и осреднение метеорологических данных обычно осуществляется для временных интервалов 30 мин. Непрерывная запись позволяет оценить баланс ПГ экосистемы как на коротких отрезках времени (0.5 ч), так и в сумме за месяц или за год (годы).

Рассчитанные величины потоков содержат случайные и систематические погрешности, возникающие из-за нарушений допущений метода, сбоев в работе оборудования или ошибок при обработке данных (Eddy ..., 2012). Процедура обработки данных предполагает использование статистических тестов для отбраковки некоторых данных, а также ввод поправок, учитывающих особенности турбулентного переноса, характеристики оборудования, его размещение в пространстве и условия регистрации данных. Регулярное обслуживание оборудования, обработка данных в строгом соответствии с принятыми в международном научном сообществе рекомендациями (Baldocchi, 2020; Eddy ..., 2012; Pastorello et al., 2020*) и большая продолжительность непрерывных наблюдений позволяет значительно сократить неопределенность оценок экосистемных потоков, получаемых на основе МТП. На сегодняшний день благодаря стандартизации требований к оборудованию, организации эксперимента и процедуры обработки данных МТП способен обеспечить высокую точ-

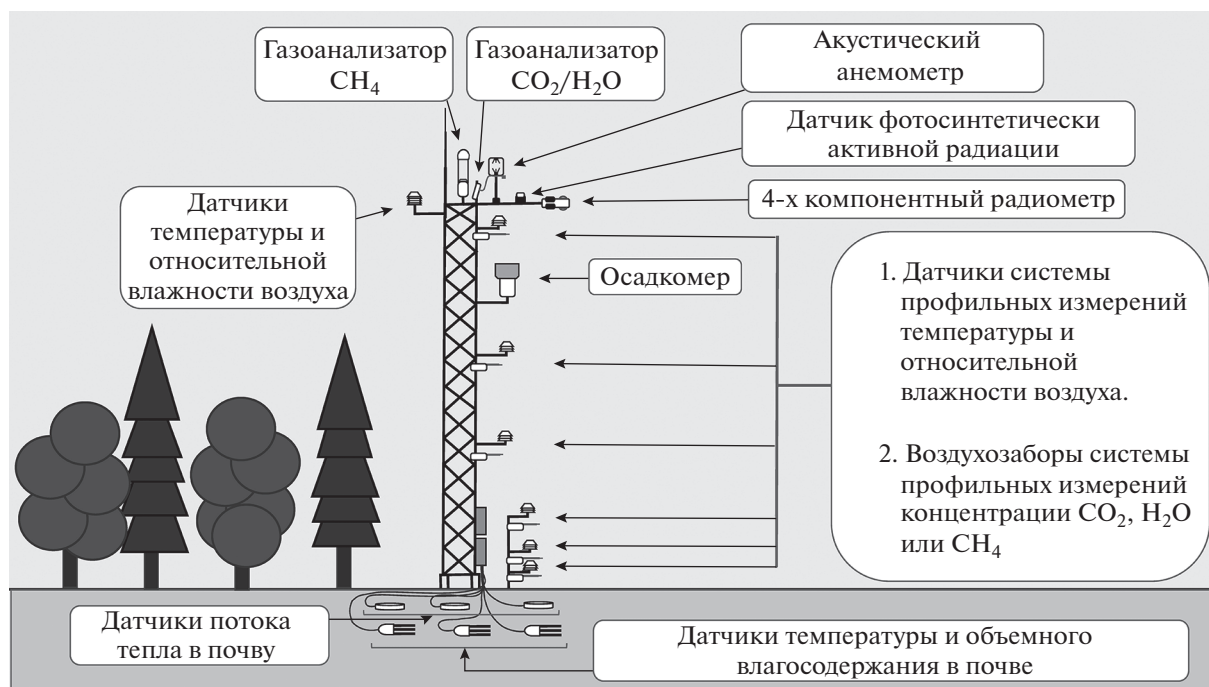


Рис. 1. Схема стандартной эколого-климатической станции в лесной экосистеме.

ность и сопоставимость получаемых оценок (Курбатова, Ольчев, 2017*).

Измеренные потоки являются осредненными по области вокруг вышки, которая называется зоной охвата или зоной влияния (в англоязычной литературе — footprint) (Hsieh et al., 2000*; Kljun et al., 2004*; Kormann and Meixner, 2001*). Осреднение осуществляется с весовой функцией (функцией футпринта), зависящей от метеорологических условий и убывающей с увеличением расстояния от вышки. 90% дальности зоны охвата вышек — это десятки—сотни метров в зависимости от высоты размещения оборудования над растительным пологом и погодных условий и типа поверхности (Burba, 2022*). Высота вышки должна быть в 1.5–2 раза больше высоты растительности (Бурба и др., 2016).

Согласно русскоязычной терминологии изучения углеродного цикла (Кудяров и др., 2007*), с помощью МТП можно прямо оценить чистый экосистемный обмен CO_2 (NEE), представляющий собой баланс вертикальных потоков CO_2 между экосистемой и атмосферой. NEE является разницей между выделением и поглощением CO_2 в экосистеме, то есть результирующей двух биологических процессов: экосистемного дыхания, TER , и валовой первичной продукции, GPP (Chapin et al., 2006*):

$$NEE = TER - GPP, \quad (1)$$

TER представляет собой выделение CO_2 в результате разложения органического вещества и

дыхания растений, а GPP — усвоение углерода растениями в процессе фотосинтеза. При $NEE > 0$ экосистема является источником CO_2 для атмосферы, а при $NEE < 0$ — стоком (происходит поглощение CO_2 из атмосферы). С помощью МТП можно непосредственно оценить только баланс экосистемы с атмосферой по вертикальным потокам CO_2 , т.е. NEE . Измеренный NEE можно затем расчетным способом разделить на TER и GPP (Wutzler et al., 2018*).

МТП также широко используется для изучения суммарного испарения экосистем, турбулентных потоков тепла и потока импульса в приземном слое атмосферы. Главное преимущество МТП — это пространственно-интегральный характер получаемых оценок потоков энергии и вещества, соответствующих площади исследуемой экосистемы (Курбатова, Ольчев, 2017*; Baldocchi, 2003*; Tramontana et al., 2016*).

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обобщение информации по станциям *RuFlux*⁴

Краткая информация по 22 станциям мониторинга, включенным в сеть *RuFlux*, представлена в табл. 1, на рис. 2 и 3. Фотографии станций, подробное описание растительности, типы почв, подробности обработки данных и описание приборной базы представлены в Дополнительных

⁴ Регионы в табл. 1 и в следующем подразделе расположены в алфавитном порядке.

Таблица 1. Станции российской сети мониторинга потоков парниковых газов между экосистемами и атмосферой RuFlux (по состоянию на ноябрь 2022 г.)

Регион	Название станции на русском (англ.)	Идентификатор	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Высота над ур. м., м	Природная зона и подзона	Тип экосистемы	Годы измерений	Публикация
Красноярский край	Зотино Сосняк Новый (Zotino Pine New)	KR-Zo1	60.80694	89.3575	112	Средняя тайга	Сосняк лишайниковый	с 2012	Park et al., 2021*
	Зотино Болото Новое (Zotino Bog New)	KR-Zo2	60.81753	89.3887	76	Средняя тайга	Сосново-кустарничково-сфагновое болото	с 2012	Park et al., 2021*
	Тура Лиственничник (Tura)	KR-Tur	64.203	100.4453	217	Северная тайга	Лиственничник кустарничково-лишайниково-зелено-мошный	с 2004	Nakai et al., 2008*
Новгородская область	Игарка Пальза (Igarka)	KR-Iga	67.48135	86.43709	29	Лесотундра (граница северной тайги)	Плоскобугристое болото (торфяник)	с 2016	Olchev et al., 2022*
	Лог Тажный (Log Tayozhny)	NO-LTa	57.96267	33.339	226	Южная тайга	Ельник с примесью сосны мелкотравчато-зеленомошный	2010–2011, с 2016	Karelin et al., 2021
	Ляли (Lyaly)	KO-Lya	62.26772	50.68032	100	Средняя тайга	Ельник черничный влажный	с 2013	Zagirova et al., 2020*
Республика Саха (Якутия)	Якша (Yaksha)	KO-Yak	61.81667	56.86666	139	Средняя тайга	Сосняк бруснично-лишайниковый	2013, с 2020	Zagirova et al., 2021*
	Усть-Пожег (Ust Pojeg)	KO-UPo	61.93406	50.227	78	Средняя тайга	Мезолиготрофное кочковато-мочажинное болото	2008–2019, планир. в 2023	Zagirova et al., 2019a*
	Спасская Падь Лиственничник (Spasskaya Pad' Larch)	YA-SP1	62.255	129.6185	214	Средняя тайга	Лиственничник брусничный (среднепродуктивный)	с 2000	Dolman et al., 2004*
Тверская область	Эльгэеи (Elgeeyi)	YA-Elg	60.016	133.824	202	Средняя тайга	Лиственничник брусничный с примесью березы (высокопродуктивный)	с 2010	Niyama et al., 2021*
	Чоккурдах (Chokurdakh)	YA-Ckd	70.8291	147.4943	5	Южная гипоарктическая (кустарничковая) тундра	Тундра: высокие участки – карликовая береза; влажная тундра с кочками; влажные сфагново-осоковые участки	2003–2021, планир. в 2023	Dolman et al., 2012
	Федоровское заболоченный ельник (Fyodorovskoye)	TV-Fyo	56.46153	32.92208	265	Южная тайга	Ельник с примесью березы сфагново-черничный	с 1998	Mamkin et al., 2023

Таблица 1. Окончание

Регион	Название станции на русском (англ.)	Идентификатор	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Высота над ур. м., м	Природная зона и подзона	Тип экосистемы	Годы измерений	Публикация
Томская область ХМАО	Федоровское неморальный ельник (Fedorovskoye dry spruce stand)	TV-Fy2	56.4476	32.9018	265	Южная тайга	Ельник с примесью клена, вяза, осины и березы ксилочно-щитовниковый	с 2000	Mamkin et al., 2022
	Федоровское вырубка (Fedorovskoye Clear-cut)	TV-Fy3	56.4435	33.0478	250	Южная тайга	Зарастающая разновозрастно-кипрейная вырубка с подростом осины и березы	с 2016	Mamkin et al., 2019a, b
	Федоровское болото (Fedorovskoye bog)	TV-Fy4	56.4727	33.0413	240	Южная тайга	Олиготрофное грядово-мочажинное сфагновое болото	1998–2000, 2013, с 2015	Mamkin et al., 2023
	Плотниково (Plotnikov)	TO-Plt	56.81374	82.85209	121	Южная тайга	Олиготрофное грядово-мочажинное болото	с 2022	—
	Мухрино Болото (Mukhrino Bog)	KM-Muh	60.89146	68.67641	34	Средняя тайга	Олиготрофное грядово-мочажинное болото	2015–2019, с 2021	Alekseychik et al., 2017
	Мухрино Рям (Mukhrino Pine)	KM-Mu2	60.89429	68.68298	34	Средняя тайга	Сосново-кустарничково-сфагновое болото	с 2022	—

Планируемые в 2023 г. станции

Регион	Название станции на русском (англ.)	Идентификатор	Долгота, в.д.	Широта, с.ш.	Высота над ур. м., м	Природная зона и подзона	Тип экосистемы
Красноярский край ХМАО	Зотино Низинное Болото	KR-Zo4	60.790278	89.490556	60	Средняя тайга	Низинное мезотрофное болото
Курская область	Мухрино Смешанный лес (Mukhrino Mixed forest)	KM-Mu3	60.89454	68.70976	35	Средняя тайга	Смешанный темнохвойно (ель, кедр)-березово-осиновый лес
	Курская биосферная станция (Kursk Biosphere Station)	KU-Kbs	51.54	36.09	243	Лесостепь дубовая	Агроландшафт (пашни) с остаточными участками широколиственных лесов и луговых степей
Московская область	Пушино, лесозарастающая пашня (Pushchino, Reforestation area)	MO-Pus	54.83041	37.55922	185	Широколиственные леса	Березняк молодой (ср. возраст древостоя 15–20 лет) с сосновым подростом. Зарастающая пашня

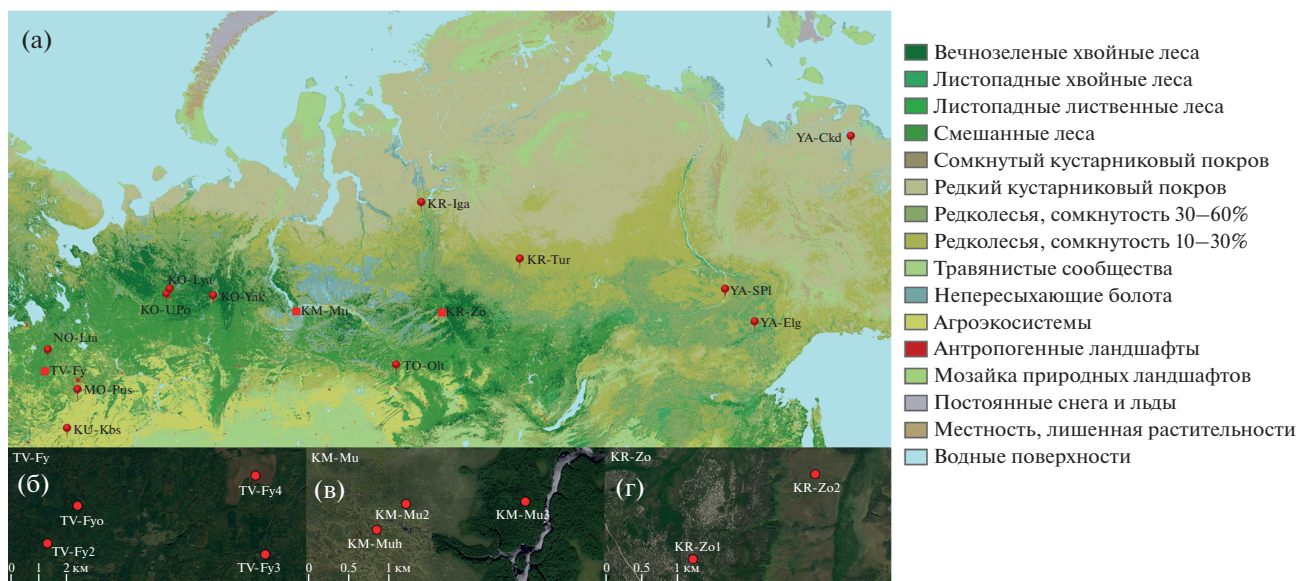


Рис. 2. Размещение измерительных комплексов (точками) и локальных сетей измерений (квадратами) RuFlux (а). В увеличенном масштабе показаны на врезках локальные сети: (б) в Тверской области (TV-Fyo, TV-Fy2, TV-Fy3, TV-Fy4), (в) Ханты-Мансийском автономном округе (KM-Muh, KM-Mu2, KM-Mu3) и (г) Красноярском крае (KR-Zo1, KR-Zo2). Индексы станций приведены в табл. 1.

Примечание: Основа карты размещения измерительных комплексов построена по данным MODIS (Broxton et al., 2014). Основа карт локальных сетей измерений — Imagery ©2022 TerraMetrics, Map Data ©2022 Google.



Рис. 3. Типичные измерительные комплексы RuFlux: (а) на плоскобугристом болоте (высота вышки 6 м, станция KR-Iga) и (б) в лесу (высота вышки 34 м, станция YA-Elg).

материалах (ДМ_2, рис. 10–12; ДМ_3, табл. 3; ДМ_4, текст и табл. 4); дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: CTGOHO.

Развитие сети наблюдений по МТП на территории России

Красноярский край — один из первых регионов России, где были начаты измерения экосистемных потоков ПГ по МТП. Региональная сеть ЭКС KrasFLUX создана на базе Института леса им. В.Н. Сукачева (ИЛ СО РАН) в экосистемах ключевых биоклиматических провинций бассейна реки Енисей (60°–67° с.ш.). История региональных исследований баланса углерода в экосистемах Средней Сибири ведет свое начало с пилотных работ в 1996–1998 гг. (Schulze et al., 1999) и их развития в рамках проектов ЕС EuroSiberian CarbonFlux (1998–2000 гг.) (Heimann, 2002) и Terrestrial Carbon Observation System (TCOS): Siberia (2002–2004 гг.) (Schulze et al., 2002a) под руководством профессора Э.-Д. Шульце, Институт биохимии общества Макса Планка (Германия). Помимо регулярных круглогодичных авиационных измерений газового состава (концентрация и изотопный состав CO₂, CH₄ и CO) в пограничном слое атмосферы Енисейского трансекта (Levin et al., 2002*; Lloyd et al., 2002a*), в 1996–1998 гг. были запущены измерения *NEE* в сосняке лишайниковом и на трех участках торфяных болот в районе п. Зотино Туруханского района Красноярского края (Чебакова и др., 2014; Arneth et al., 2002*; Lloyd et al., 2002b*; Schulze et al., 1999; Schulze et al., 2002b*; Shibistova et al., 2002a*, b*; Tchebakova et al., 2002*), четырехзлаковой степи с преобладанием ковыля в Северной Хакасии (южные районы Средней Сибири) (Чебакова и др., 2014; Beletti Marchesini et al., 2007*). Позднее, в 2000 г., ЭКС начали функционировать на трех участках средней тайги: в березняке, смешанном темнохвойном лесу и пихтарнике в районе п. Ворогово Туруханского района (Röser et al., 2002*). Наблюдения по МТП на ЭКС в районе п. Ворогово осуществлялись до конца вегетационного сезона 2000 г., в районе п. Зотино и в Хакасии — до 2002–2004 гг., после чего, в связи с окончанием международной программы исследований, измерительные системы были демонтированы. В 2004–2006 гг. была создана международная обсерватория “ЗОТТО” в (25 км западнее п. Зотино) и запущены круглогодичные прецизионные исследования концентрации ПГ и аэрозолей атмосферы с помощью уникального комплекса научного оборудования на базе мачты высотой 300 м (Тимохина и др., 2018*; Урбан и др., 2019*). Зона охвата измерений обсерватории составляет более 2.5 млн км² (Урбан и др., 2019*). Для масштабирования инте-

грированных оценок баланса углерода в период с 2004 по 2016 г. была размещена целая сеть ЭКС в ключевых экосистемах. В 2016–2019 гг. работала ЭКС в пихтарнике осоково-разнотравном (вышка демонтирована в 2022 г.). Измерения *NEE* на базе ЭКС дополнены регулярными камерными наблюдениями потоков углерода. В 2018 г. в эстуарной зоне р. Енисей создана обсерватория “DIAMIS” и запущены круглогодичные измерения ПГ в приземной/приводной атмосфере на юго-западном побережье полуострова Таймыр для территории площадью ~625 тыс. км² (Панов и др., 2022*; Panov et al., 2022*).

В настоящее время в Средней Сибири функционируют ЭКС в четырех биогеоценозах (KR-Zo1, KR-Zo2, KR-Tur, KR-Iga; см. ДМ_5, ч. 1; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: CTGOHO). На двух южных ЭКС поддерживаются стационарные круглогодичные наблюдения, на двух северных — сезонные (апрель–октябрь). В 2023 г. планируется запуск новой станции (KR-Zo4) на низинном болоте около обсерватории “ЗОТТО”.

В *Новгородской области*, в северо-западной части Европейской территории России, на Валдайской возвышенности расположен исследовательский полигон “Лог Таежный”, принадлежащий Валдайскому филиалу Государственного гидрологического института (ВФ ГГИ), проводящему здесь гидрологические наблюдения. ЭКС NO-Lta (см. ДМ_5, ч. 2; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: CTGOHO) расположена на территории Национального парка “Валдайский” в 110-летнем ельнике мелкотравчато-зеленомошном с примесью сосны (Замолодчиков и др., 2017*).

Республика Коми. Первые комплексные исследования гидрологического режима, растительного покрова, запасов углерода и энерго-массообмена на мезо-олиготрофном болоте Усть-Пожег (станция КО-УРо), или Медла-Пэв-Нюр, проведены в 2006–2010 гг. специалистами из Германии в рамках международного проекта Евросоюза “Quantifying the carbon budget in northern Russia: past, present and future”. В 2012–2016 гг. исследования были продолжены сотрудниками Института биологии Коми НЦ УрО РАН в рамках международного проекта ПРООН/ГЭФ “Strengthening protected area system of the Komi Republic to conserve virgin forest biodiversity in the Pechora river headwaters”. В 2013–2014 гг. был обновлен измерительный комплекс КО-УРо, а также открыты еще 3 ЭКС (см. ДМ_5, ч. 3; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: CTGOHO): в ельнике (КО-Ля), в сосняке

(КО-Yak), а также на крупнобугристом болоте в Инте. Станция в Инте к 2022 г. остановлена.

В Республике Саха (Якутия) силами сотрудников Института биологических проблем криолитозоны СО РАН создана уникальная в мире и в России международная сеть ЭКС SakhaFluxNet по изучению климатических и биогеохимических циклов в мерзлотной зоне на Северо-востоке России. Здесь в течение 30 лет в рамках 53-х международных и межправительственных проектов по изучению изменения климата с 18 странами мира созданы четыре крупные научные станции мирового уровня, входящие в сети наблюдений Global Carbon Project, CarboEurope, AsiaFlux и ScanNet. Исследованы климатические и биогеохимические особенности репрезентативных мерзлотных экосистем России, оценено состояние природной среды, выявлен характер взаимодействия всех ее частей — атмосферы, биосферы, гидросферы, криолитосферы. ЭКС (см. ДМ_5, ч. 4; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: CTGOHO) были организованы в репрезентативных лесных, лесотундровых и тундровых экосистемах Восточной Сибири (“Эльгээйи” — YA-Elg, 60° с.ш.; “Спасская падь” — YA-SPl, 62° с.ш.; “Кодак”, 70° с.ш.; “Чокурдах” — YA-Ckd, 70° с.ш.). ЭКС Кодак демонтирована в 2016 г. На всех станциях Якутии в связи с суровыми зимними погодными условиями измерения ведутся только в период апрель–октябрь. Для оценки *NEE* в остальную часть года используется зависимость *TER* от *T*, и *NEE* в холодный период (между измерениями) оценивается по модели (Dolman et al., 2004*).

В Тверской области в конце прошлого века были начаты первые на Европейской территории РФ наблюдения на ЭКС на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника. Исследования проводят сотрудники Лаборатории биогеоэкологии им. В.Н. Сукачева Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН. Растительность заповедника представлена, в основном, ельниками различной продуктивности, значительную долю территории занимают верховые болота (Минаева, 2001*; Пузаченко и др., 2007*). Основные факторы динамики лесных экосистем — ветровалы и сплошные рубки в зоне рационального природопользования заповедника (Пузаченко и др., 2015*; Vygodskaya et al., 2002*). В рамках международного проекта EuroSiberian Carbonflux в июне 1998 г. начали работу ЭКС в ельнике сфагново-черничном (Milyukova et al., 2002*) и ЭКС на верховом болоте Старосельский мох (Новенко, 2011*; Носова, 2009*; Ivanov et al., 2021*; Kurbatova et al., 2002*); также работала станция на ветровале (Knohl et al., 2002*). В 1999 г. программа исследований была расширена станцией наблюдений в неморальном ельнике.

В 2000 г. на болоте в связи с окончанием международного проекта измерительный комплекс был демонтирован. В 2015 г. при поддержке грантов российских научных фондов пульсационные наблюдения на болоте были возобновлены, а также установлены датчики метана и обновлена приборная база на лесных ЭКС. По состоянию на осень 2022 г. круглогодичные наблюдения ЭКС поддерживаются в 4-х экосистемах (см. ДМ_5, ч. 5; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: CTGOHO); двух ельников с различным гидрологическим режимом (TV-Fyo, TV-Fy2), на зарастающей вырубке (TV-Fy3), а также на верховом болоте (TV-Fy4). Подробное описание объектов исследования и приборной базы представлено в публикациях (Kurbatova et al., 2008; Mamkin et al., 2022; Vygodskaya et al., 2004*).

Томская область. Стационар Плотниково (Плотниковский таежный стационар) основан в 1970 г. Институтом почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск) в с. Плотниково Бакчарского района Томской области. Проводятся комплексные исследования почв и растительности. В 1993 г. на Бакчарском болоте (в 16 км на юго-запад от стационара) начаты исследования потоков CH_4 и CO_2 на границе “болото–атмосфера” (Краснов и др., 2015*; Паников, 1995*; Maksyutov et al., 1999*). Первые измерения по МТП на олиготрофном грядово-мочажинном комплексе и открытом мезотрофном участке Бакчарского болота (ТО-Plt) в вегетационные сезоны 1998 (с апреля) и 2000 гг. проводили исследователи из Японии (Shimoyama et al., 1999*, 2003*, 2004*). В рамках Программы СО РАН, проекта Минобрнауки РФ, а также в рамках программы Карбонового полигона Томской области пульсационные наблюдения возобновлены в 2022 г.

Ханты-Мансийский автономный округ. Наблюдения по МТП проводятся на базе международной полевой станции Мухрино (Alekseychik et al., 2016*; Lapshina et al., 2015*) Югорского государственного университета. Станция расположена в центральной части Западной Сибири, в 20 км к юго-западу от Ханты-Мансийска, на второй террасе левого берега р. Иртыш (недалеко от слияния с р. Обь). Станция открыта в 2009 г. при поддержке Правительства Ханты-Мансийского автономного округа и компании “Салым Петролеум Девелопмент Н.В.”, развивалась при поддержке проектов INTERACT, РФФИ, гранта Правительства Тюменской области, а также Карбонового полигона “Мухрино”. Ведется мониторинг биоразнообразия, скорости разложения органического вещества, гидрометеорологические наблюдения (Dyukarev et al., 2021a*, b*). Нетронутое болото Мухрино имеет площадь около ~75 км²,

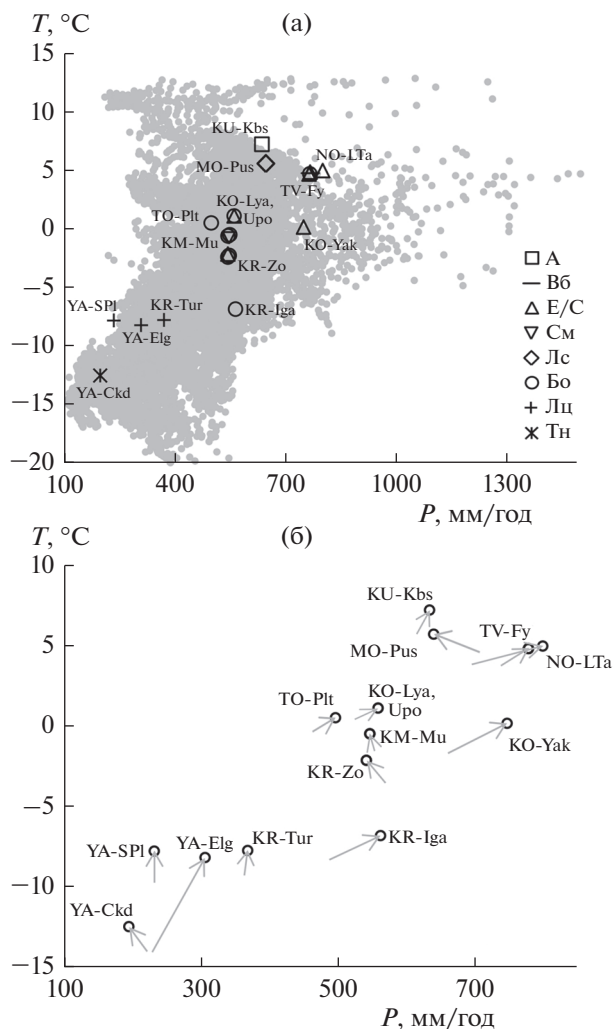


Рис. 4. Распределение станций наблюдений по среднегодовой температуре воздуха (T) и годовой сумме осадков (P) по ближайшей к измерительному комплексу стандартной метеостанции за 1991–2020 гг.: (а) распределение на фоне T и P по всей территории России; (б) современное изменение климата по ближайшей к станции RuFlux метеостанции. Коды станций приведены в табл. 1.

Примечания. На рис. 4а серые кружки показывают среднегодовую T и P из архива CRU TS v4.03 (Harris et al., 2020*) по регулярной сетке 0.5° для всей территории России за 1991–2020 гг. Значки, обозначающие станции (в зависимости от типа экосистемы и растительности): А — агроландшафт, В6 — вырубка, Е/С — еловый или сосновый лес, См — смешанный лес, Лс — лиственный лес, Бо — болото, Лц — лиственный лес, Тн — тундра. Индексы станций приведены в табл. 1. На рис. 4б начало стрелки — T и P за 1961–1990 гг., черные кружки — T и P за 1991–2020 гг. Первый период для станции TO-Plt — 1966–1990 гг., для MO-Pus — 1973–1990 гг.

основную часть занимают обширные грядово-мочажинные комплексы, по периферии расположены сосново-кустарничково-сфагновые участки (Lamentowicz et al., 2015*; Tsyganov et al., 2021*). Средняя глубина торфа составляет 3.3 м, макси-

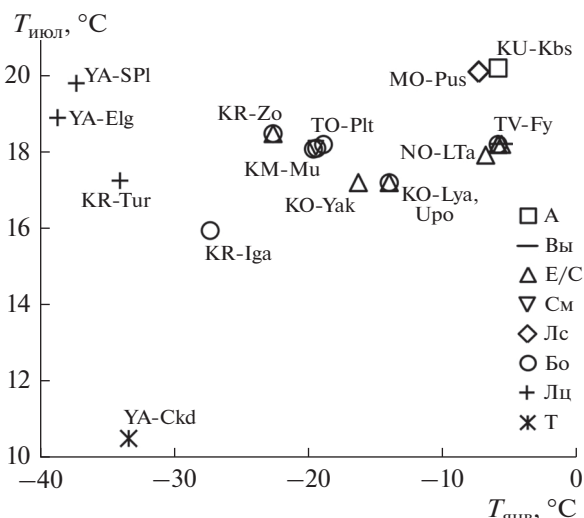


Рис. 5. Распределение станций наблюдений по средней температуре января ($T_{\text{январь}}$) и июля ($T_{\text{июль}}$) по ближайшей к измерительному комплексу стандартной метеостанции за 1991–2020 гг. Обозначение станций см. на рис. 4. Индексы станций приведены в табл. 1.

мальная — более 5 м (Bleuten et al., 2020*). По состоянию на осень 2022 г. в Мухрино действуют две ЭКС: KM-Muh и KM-Mu2 (см. ДМ_5, ч. 6; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: СТГОНО).

Система наблюдений за потоками ПГ на станции “Мухрино” продолжает расширяться. Установлена вышка в массиве смешанного леса, в 2023 г. планируется запуск наблюдений.

Таким образом, 16 действующих станций измерений объединены в пять региональных сетей в следующих регионах: Красноярский край, Республика Коми, Республике Саха (Якутия), Тверская область, Ханты-Мансийский автономный округ; еще две станции функционируют в Новгородской и Томской областях. В 2023 г. планируется установка двух новых ЭКС в Московской (MO-Pus) и Курской (KU-Kbs) областях. Еще по одной станции планируется запустить в Красноярском крае (KR-Zo4) и Ханты-Мансийском автономном округе (KM-Mu3).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Репрезентативность станций для территории России

Для оценки репрезентативности распределения станций по территории России они размещены в координатах средней многолетней T и годовой суммы P (рис. 4), $T_{\text{января}}$ и $T_{\text{июля}}$ (рис. 5), показана доля станций в разных биоклиматических зонах и типах экосистем (рис. 6).

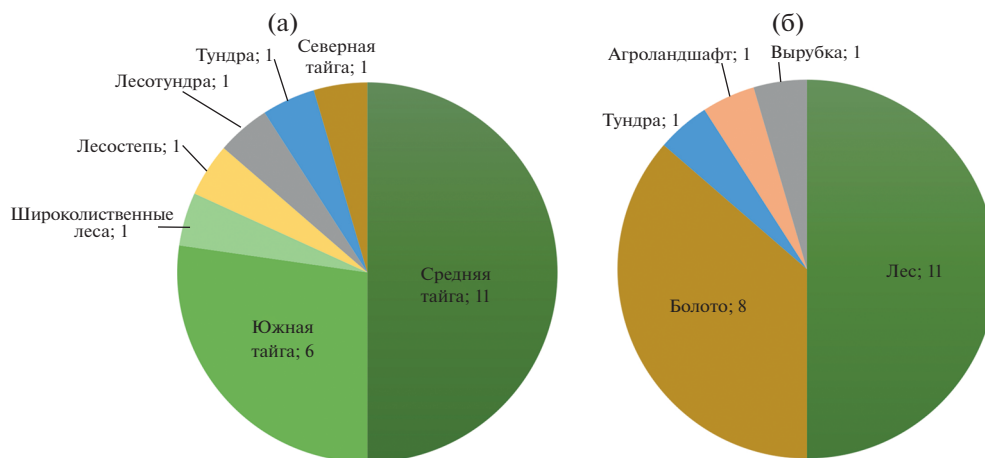


Рис. 6. Распределение станций наблюдений RuFlux по основным биоклиматическим зонам (а) и в разных типах экосистем (б).

Примечание: Деление природных зон и подзон дано согласно общим принципам классификации С.Ф. Курнаева (1973*, 1982*).

Диапазон среднегодовых T на станциях RuFlux составил от -12.5 (YA-Ckd) до 5.0°C (NO-LTa). Диапазон среднегодовых P составил от 196 (YA-Ckd) до 799 мм (NO-LTa). T июля на всех станциях, кроме лесотундровой станции KR-Iga и тундровой станции YA-Ckd, находится в пределах $17-20^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 5), в то время как T января изменяется при движении с востока на запад от -38.7 (YA-Elg) до -5.9°C (KU-Kbs). По средней T июля ($+10.5^{\circ}\text{C}$) резко выделяется самая северо-восточная станция сети в тундре Якутии, YA-Ckd.

В районах всех станций RuFlux, согласно данным ближайших к ним станций стандартной метеорологической сети, наблюдается увеличение среднегодовых T в период 1991–2020 гг. по сравнению с периодом 1961–1990 гг. (см. рис. 46, серые стрелки). Для 12 станций из 22 увеличение среднегодовой T превышает одно среднеквадратичное отклонение. Минимальное увеличение составило 0.7°C (KO-Lya, KO-UPo), максимальное – 5.9°C (YA-Elg), среднее – $1.4 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$ ($\pm\text{SD}$); это меньше, чем по России за тот же период – около 2.0°C (Доклад ..., 2020*). Это свидетельствует о том, что регионы России, в которых изменения климата происходят наиболее интенсивно, слабо охвачены измерениями потоков ПГ. На семи станциях отмечено увеличение среднегодового количества P , на девяти – уменьшение, на шести изменения крайне малы; в среднем по сети ни на одной станции изменение годовой суммы P не превышало среднеквадратичного отклонения. Тренды P не зависели от географического положения.

Большая часть (76%) станций RuFlux расположена в подзонах средней и южной тайги (см. рис. 6) в лесных и болотных экосистемах. Четыре из пяти станций в лесных экосистемах Европейской терри-

тории России находятся в еловых лесах (NO-LTa, KO-Lya, TV-Fyo, TV-Fy2); единственная станция расположена в сосновом лесу (KO-Yak), по состоянию на 2022 г. ни одной станции не действовало в мелколиственных лесах. В 2023 г. планируется запустить измерения на двух станциях (TV-Fy3, MO-Pus) в молодняках, сформированных мелколиственными лесообразующими породами (береза, осина).

Количество станций-лет либо станций-вегетационных сезонов, измеренных на ЭКС сети RuFlux, также намного больше в лесах, чем во всех остальных типах экосистем. Так, если сравнивать июльские данные, для лесов имеются измерения более чем по 70 таким месяцам, а для болот – только 13. В первую очередь это обусловлено наличием длинных рядов наблюдений на станциях в двух лесных экосистемах: TV-Fyo (24 полных года наблюдений по состоянию на 2022 г.) и YA-SPI (23 полных года наблюдений).

Чистый экосистемный обмен

Суммы NEE за год и за вегетационный сезон. По состоянию на 2015–2020 гг. все экосистемы, кроме вырубки (TV-Fy3) и двух ельников Тверской области (TV-Fyo, TV-Fy2), функционировали как стоки CO_2 из атмосферы (табл. 2). При этом суммы NEE только за вегетационный сезон в ельниках были также отрицательными. На разных станциях суммы NEE за вегетационный сезон варьировали от -40 до -270 г $\text{C}/\text{м}^2$.

Если не учитывать станцию на вырубке (TV-Fy3), только одна экосистема – заболоченный ельник в Тверской области (TV-Fyo) – являлась в среднем за все годы (с 1999 г.) источником CO_2 для атмосферы. Из 23 лет измерений еловый лес TV-Fyo 19

Таблица 2. Чистый экосистемный обмен углекислого газа (*NEE*) на станциях RuFlux

Станция	<i>NEE</i> * $\pm$ <i>SD</i> между годами (годы, за которые посчитана сумма), г С/м ²		Источник
	год	вегетационный период	
KR-Zo1	–193 (2015)	От –139 до –253 (2013–2021)	Данные авторов
KR-Zo2	–91 (2015)	От –86 до –132 (2013–2021)	Данные авторов
KR-Tur	–	От –53 до –168 (2004–2005, 2007–2008, 2013–2021)	Данные авторов
KR-Iga	–	От +23 до –58 (2016–2020)	Данные авторов
NO-LTa	–300 (2010–2011), –90 (2018)		Karelin et al., 2021
KO-Lya	–	–327 (2013), –174 (2016)	Zagirova et al., 2019b
KO-UPo	–	–85 (2012), –77 (2013)	Mikhaylov et al., 2019
YA-SPI	–212 $\pm$ 34 (2000–2001, 2003–2011, 2013–2014)		Maximov et al., 2019
YA-Elg	–243 $\pm$ 23 (2010–2015)		Maximov et al., 2019
YA-Ckd	–75 $\pm$ 14 (2003–2011)		Maximov et al., 2019
TV-Fyo	200 (1999–2004) 73 $\pm$ 80 (2005–2014) 31 $\pm$ 74 (2015–2020) 106 $\pm$ 122** (1999–2020)	– От –142 до 28 (2015–2020)	Kurbatova et al., 2008 FLUXNET2015*** Mamkin et al., 2023 FLUXNET2015 ³ и Mamkin et al., 2023
TV-Fy2	–144 (1999–2004) 89 $\pm$ 103 (2016–2020)	– От –158 до 121 (2016–2020)	Kurbatova et al., 2008 Mamkin et al., 2022
TV-Fy3	–	От 193 до 553 (2016–2020)	Mamkin et al., 2019a, b
TV-Fy4	– –	–60 (1998) 26 (1999)	Schulze et al., 1999 Kurbatova et al., 2009
	–95 (2020)	От –108 до –132 (2016, 2019, 2020)	Mamkin et al., 2023
KM-Muh	– –83 (2022)	–202 (2015) –115 (2022)	Alekseychik et al., 2017 Данные авторов
TO-Plt	–	–88 (2022)	Данные авторов

Примечание. * Отрицательный *NEE* означает нетто-сток углекислого газа из атмосферы в экосистему.

** Ряд нестационарен: имеется значимый нисходящий тренд.

*** <https://fluxnet.org/data/fluxnet2015-dataset/> (дата обращения 13.11.2022).

лет был источником CO₂ и всего 4 года – стоком. В ельнике TV-Fyo около 80% высокой экосистемной эмиссии CO₂ составляло дыхание почвы (Kurbatova et al., 2013*). В неморальном ельнике TV-Fy2, находящемся в нескольких километрах от заболоченного, в среднем за 1999–2004 гг. зафиксировано нетто-поглощение CO₂ (*NEE* = –200 г С/м² в год), а в среднем за 2016–2020 – уже нетто-эмиссия (*NEE* менее 100 г С/м² в год).

В ельнике в Республике Коми (KO-Lya) *NEE* составил –327 (2013 г.) и –174 г С/м² (2016 г.) за вегетационный сезон; судя по имеющимся отрывочным измерениям *NEE* в зимний период, в первом случае ельник был средним по величине стоком CO₂ в целом за год, а во втором годовой баланс CO₂ был около нуля. В сезон с меньшим стоком отмечен дефицит *P* и высокая *T* в начале вегетации. *NEE* по области охвата вышки в Новгородской об-

ласти (NO-LTa) изменился с –300 г С/(м² год) в 2010–2011 г. до –90 г С/(м² год) в 2018 г. (Karelin et al., 2021).

В отличие от тайги Европейской территории, среднетаежные экосистемы Сибири были стабильным стоком CO₂ для атмосферы с величинами от умеренных до значительных. Среднетаежные лиственничники Якутии в зоне многолетней мерзлоты (YA-SPI и YA-Elg) представляют собой большой по величине сток CO₂, в среднем более 200 г С/(м² год). *NEE* в зимний период, по оценкам (Dolman et. al., 2004*; Takata et al., 2017*), составлял на станции YA-SPI всего лишь около 20–35 г С/(м² сезон). Оценки *NEE* за вегетационный сезон для станций YA-SPI и YA-Elg составляют –230...–275 г С/(м² сезон) соответственно. Очень схожие значения стока зафиксированы в среднетаежном сосняке лишайниковом (KR-Zo1) в Крас-

ноярском крае (до 250 г С/м^2 сезон)). Северотаежный лиственничник в зоне многолетней мерзлоты в Красноярском крае за вегетационный сезон был более слабым стоком CO_2 (в пределах $50\text{--}170 \text{ г С/м}^2$ сезон)), чем упомянутые выше экосистемы.

Три болота и сосновый рям подзоны средней тайги на Европейской территории России, в Западной и Средней Сибири (КО-Уро, КМ-Мух, ТО-Пл, КР-Зо2) были небольшим или средним (в пределах $100\text{--}150 \text{ г С/м}^2$ в год) стоком CO_2 . Плоскобугристое болото около Игарки (КР-Ига) в экотоне лесотундры, а также верховое болото в Тверской области (ТВ-Фу4) выступали слабым источником CO_2 в один год среди пяти лет измерений (в пределах 50 г С/м^2 в год), а в остальные четыре года измерений они представляли собой стоки CO_2 с величиной до 100 г С/м^2 в год. Таким образом, болота являются небольшими либо средними по интенсивности стоками CO_2 , за исключением единичных лет на отдельных болотах.

Единственная по состоянию на осень 2022 г. станция мониторинга RuFlux в тундре (YA-Ckd) была относительно небольшим (в пределах 100 г С/м^2 в год) и устойчивым стоком CO_2 .

В отличие от ненарушенных экосистем, единственная в выборке антропогенно-измененная экосистема — вырубка — была очень сильным источником CO_2 для атмосферы (от 190 до 550 г С/м^2 за вегетационный сезон). По данным измерений в 1998 г., ветровал второго года зарастания в еловом лесу Тверской области также являлся источником CO_2 для атмосферы (Knohl et al., 2002*).

Межгодовая изменчивость и многолетние тренды *NEE*. На подавляющем большинстве лесных станций отмечена значительная межгодовая изменчивость баланса CO_2 , связанная, в первую очередь, с межгодовыми вариациями погодных условий и, во вторую очередь, — с режимом нарушений. Межгодовая изменчивость баланса CO_2 в лесах России в целом снижалась с запада на восток.

Четыре ельника Европейской территории России, в которых ведутся наблюдения по МТП, демонстрируют большие межгодовые вариации *NEE* по сравнению с лесами Сибири. В трех ельниках также зафиксированы долговременные тренды *NEE*. Ельник КО-Луа был стоком CO_2 для атмосферы либо был примерно углеродно-нейтральным в 2013 и 2016 гг., ТВ-Фу2 был стоком в начале 2000-х, но стал источником в 2016–2020 гг., ТВ-Фуо был снижающимся источником CO_2 для атмосферы в течение периода с 1998 по 2020 г., и NO-LTa был стоком в 2010–2011 и 2018 гг., но стал источником в 2020–2022 гг.

Баланс углекислого газа ельника ТВ-Фуо отличался двумя специфическими особенностями: во-первых, большим разбросом значений *NEE* между годами (от 359 до -63 г С/м^2 в год за период 1999–2020) и, во-вторых, значимым (тест Манна–Кендалла, $p < 0.01$) снижением годовых сумм *NEE* на протяжении многолетнего ряда измерений. За 23 года из сильного источника CO_2 (до $350\text{--}360 \text{ г С/м}^2$ в год в 1999 и 2001 гг.) ельник стал слабым источником (в пределах 50 г С/м^2 в год в среднем за 2016–2020). Вероятно, это было связано с повышением весенних и зимних *T* (что смещало баланс углерода ельника в сторону стока CO_2), а также с интенсивным развитием подроста. Такая же большая изменчивость между годами, но при этом противоположно направленный тренд *NEE* выявлен для соседнего неморального ельника ТВ-Фу2. В зоне охвата измерений ТВ-Фу2 вследствие сильного ветра в 2017 г. появились отдельные упавшие деревья и небольшая площадь, занятая ветровалом.

Ельник NO-LTa в 2010–2011 гг. был сильным стоком CO_2 для атмосферы, в 2018 г. — уже слабым стоком, а после ветровала 29.10.2019 перешел в состояние источника CO_2 . Анализ величины *NEE* по направлениям ветра показал высокую положительную корреляцию между эмиссией CO_2 и площадями, занятыми усыхающим древостоем и безлесными участками в области охвата вышки (Karelin et al., 2021). Снижение модуля *NEE* между 2010–2011 и 2018 гг. не может быть объяснено только различием погодных условий; наиболее вероятно, оно было связано с массовой гибелью древостоя (Karelin et al., 2021).

Таким образом, в непосредственной близости от станций NO-Lta, ТВ-Фуо и ТВ-Фу2, в зоне охвата вышек, в 2010-х годах появились большие очаги усохших елей и/или ветровалов; фактически, на этих станциях по состоянию на 2022 г. оцениваются потоки CO_2 в экосистемах с сильными природными нарушениями. В целом, обобщение данных пульсационных измерений в еловых лесах Европейской территории России показывает значительную нестабильность баланса углерода в этих лесах.

Для лесных экосистем Средней и Восточной Сибири характерны наименьшая из всех лесов относительная изменчивость сумм *NEE* по годам и устойчивый год от года сток CO_2 . Диапазон изменчивости *NEE* в лесах северной и средней тайги (КР-Зо1, КР-Тур, YA-SPl, YA-Elg) составлял около 100 г С/м^2 в год. Межгодовая изменчивость в лиственничниках Якутии была связана с вариацией погодных условий. Из 16 лет (2000–2015) на станции YA-SPl наименьший сток (170 г С/м^2 в год) был зафиксирован в очень сухой 2001 г., а максимальный (270 г С/м^2 в год) — в сравнительно влажный 2006 г. Наблюдалось значительное умень-

шение аккумуляции CO_2 как в засушливые, так и в сильно переувлажненные годы (Максимов и др., 2005*; Iwasaki et al., 2010*; Maximov et al., 2003*). В целом, высокочувствительные экосистемы криолитозоны могут быть и источниками CO_2 в зависимости от сезона, погодных условий и интенсивности лесных пожаров (Maximov et al., 2019). Межгодовые вариации углеродного баланса мерзлотных лесных экосистем важно учитывать при верификации и валидации бюджета углерода России.

Межгодовая вариация абсолютных значений *NEE* в тундре северо-восточной Якутии (YA-Ckd) была еще меньше, чем в среднепродуктивном лиственничном лесу (YA-SPl) в Центральной Якутии (Maximov et al., 2019).

Болота являются достаточно устойчивыми стоками CO_2 , хотя отдельные болота в засушливые годы могут стать слабыми источниками CO_2 (TV-Fy4 в 1999 г. и KR-Iga в 2016 г.).

Сезонный ход *NEE* и продолжительность вегетационного сезона. Все экосистемы, кроме вырубки (TV-Fy3) функционировали в среднем за вегетационный период как стоки CO_2 из атмосферы (рис. 7) благодаря преобладанию *GPP* над *TER*. Так как почти все холодное время года экосистемы были источниками CO_2 из-за преобладания эмиссии CO_2 из почв в атмосферу, то длительность вегетационного сезона может быть важным фактором, влияющим на экосистемный баланс CO_2 в сумме за год (Masyagina et al., 2020*).

Продолжительность вегетационного сезона⁵ уменьшалась при движении с запада на восток и от лесов к безлесным типам растительности (рис. 8). Средняя длительность вегетационного сезона в течение 2015–2022 гг. (за имеющиеся годы измерений) для разных ЭКС в лесах составляла от 117 дней в средней тайге Восточной Сибири до 188 дней в южной тайге западной части Европейской территории России.

На болотах Европейской территории России вегетационный сезон был на три-семь недель короче по сравнению с лесами из-за более позднего таяния снега. На сосновом ряме KR-Zo2 нетто-поглощение CO_2 длилось на две недели меньше, чем в сосняке KR-Zo1. На тундровой (YA-Ckd) и лесотундровой (KR-Iga) станциях вегетационный сезон составлял всего 62 и 72 дня соответственно и был в среднем вдвое короче вегетационного сезона лесов средней тайги (YA-SPl, YA-Elg, KR-Zo1).

⁵ Вегетационный сезон определен как сезон между сроками перехода среднесуточного *NEE* экосистемы от источника к стоку весной или в начале лета и от стока к источнику осенью. Начало и конец вегетационного сезона для большинства станций определены по графикам кумулятивного *NEE* (см. рис. 7) как локальные экстремумы: положительный весной либо в начале лета и отрицательный — осенью.

Весенние значения *NEE*

В ельниках Европейской территории России (TV-Fyo, TV-Fy2, KO-Lya), а также на станции измерений в пихтарнике в Зотино отмечено раннее начало поглощения CO_2 , еще при отрицательных среднесуточных *T*. Отрицательные значения *NEE* в это время зависели от фотосинтетически активной радиации и *T* и, по-видимому, представляли собой не технические артефакты измерений, а результат фотосинтетической активности вечнозеленых растений (полога и нижних ярусов). Более того, в апреле либо мае, при еще отрицательных *T*, до полного схода снежного покрова, измерительные системы фиксировали небольшие стоки даже в лиственничниках (KR-Tur, YA-Spl, YA-Elg). Их происхождение остается вопросом дальнейших исследований.

У заболоченного ельника TV-Fyo поглощение CO_2 в основном происходило весной (май), а уже начиная с июля он становится источником CO_2 для атмосферы. Таким образом, погодные условия весны во многом определяли годовой баланс CO_2 TV-Fyo.

Летние значения *NEE*

Для сравнения способности к поглощению CO_2 экосистемами рассмотрены значения в июле, т.е. в середине лета, когда на большинстве станций отмечается близкое к максимальному нетто-поглощение CO_2 . Для каждой станции было найдено среднее значение, а также стандартное отклонение (рис. 9а) для всех дней из нескольких июлей, выбранных для анализа. Июли были включены в выборку, если выполнялись три условия: 1) имеются измерения для всего месяца; 2) на станциях с большим количеством лет наблюдений были взяты только 3 последних года (для обеспечения сопоставимых размеров выборок на станциях с малым и большим количеством лет наблюдений); 3) год не был аномальным по погодным условиям. В середине лета вариации суточного *NEE* в лесах Европейской территории России оказались больше, чем в Сибири.

Из всех анализируемых экосистем наибольшие флуктуации июльских значений оказались характерны для единственной антропогенно нарушенной экосистемы — вырубки TV-Fy3. На Европейской территории России вариация суточных сумм *NEE* в июле на болоте (TV-Fy4) была меньше, чем в лесах (TV-Fyo, TV-Fy2, NO-LTa, KO-Lya). Требуется уточнить, что у сосняка в Республике Коми KO-Yak максимальный сток был отмечен в июне, у ельника TV-Fyo — в мае. Суточные суммы *NEE* в июле сравнительно слабо менялись на болотах подзон средней и южной тайги Западной Сибири (KM-Muh, TO-Plt). Однако на этих станциях имеются данные только по одному

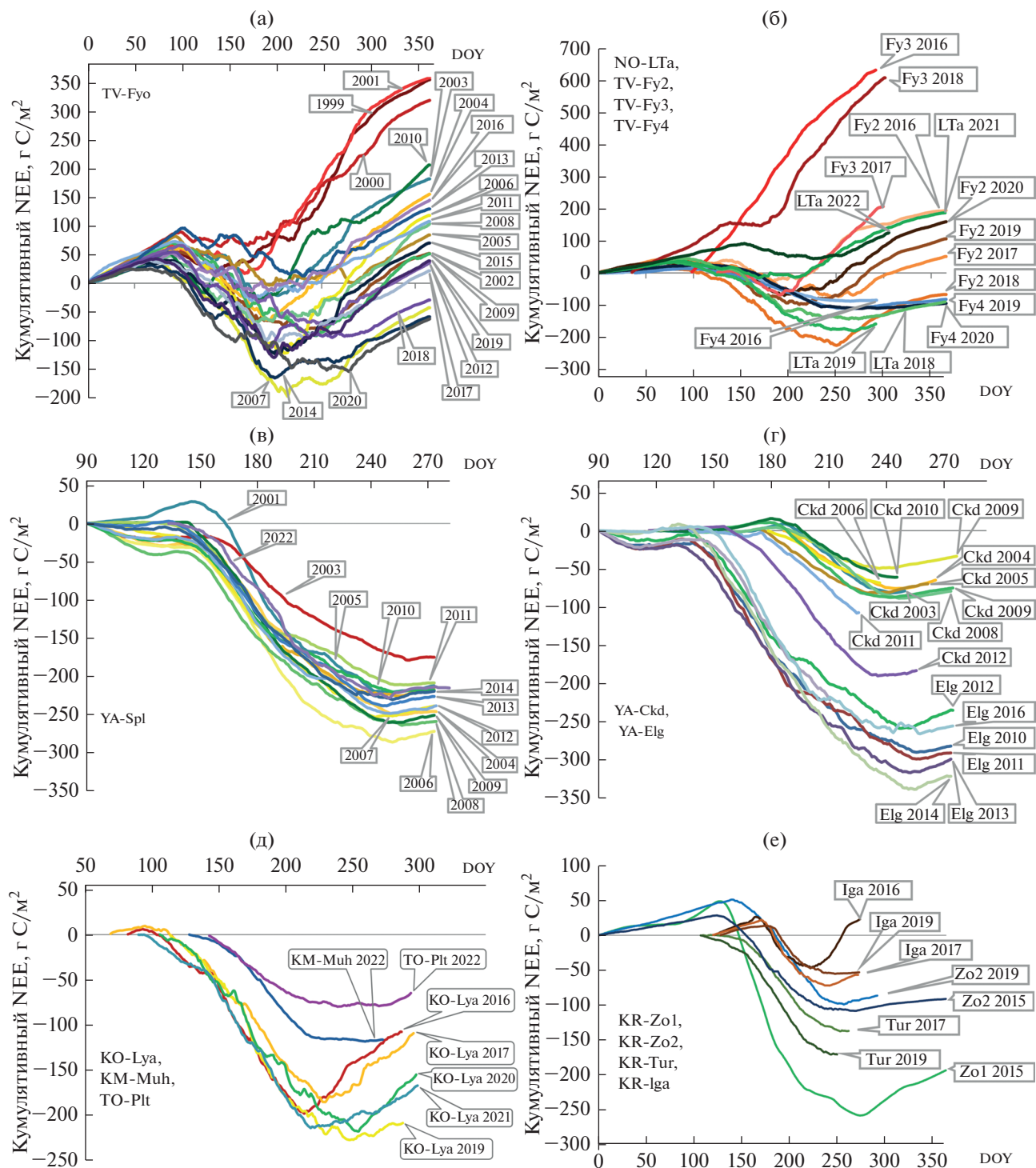


Рис. 7. Кумулятивный чистый экосистемный обмен CO_2 (NEE) в зависимости от дня года (DOY): в различных экосистемах Тверской и Новгородской областей (а, б); в лиственничниках и тундре Якутии (в, г); в лесных и болотных экосистемах Республики Коми, Ханты-Мансийского АО и Томской области (д); в лесных и болотных экосистемах Красноярского края (е).
 Примечание: Каждая линия представляет собой накопление суточных значений NEE за один год измерений. Коды станций приведены в табл. 1.

году и для более надежных выводов требуются более длительные измерения. Вариация NEE в июльские дни увеличивалась в лиственничниках

от низкопродуктивного северотаежного (KR-Tur) к среднепродуктивному среднетаежному (YA-SPI) и далее к высокопродуктивному средне-

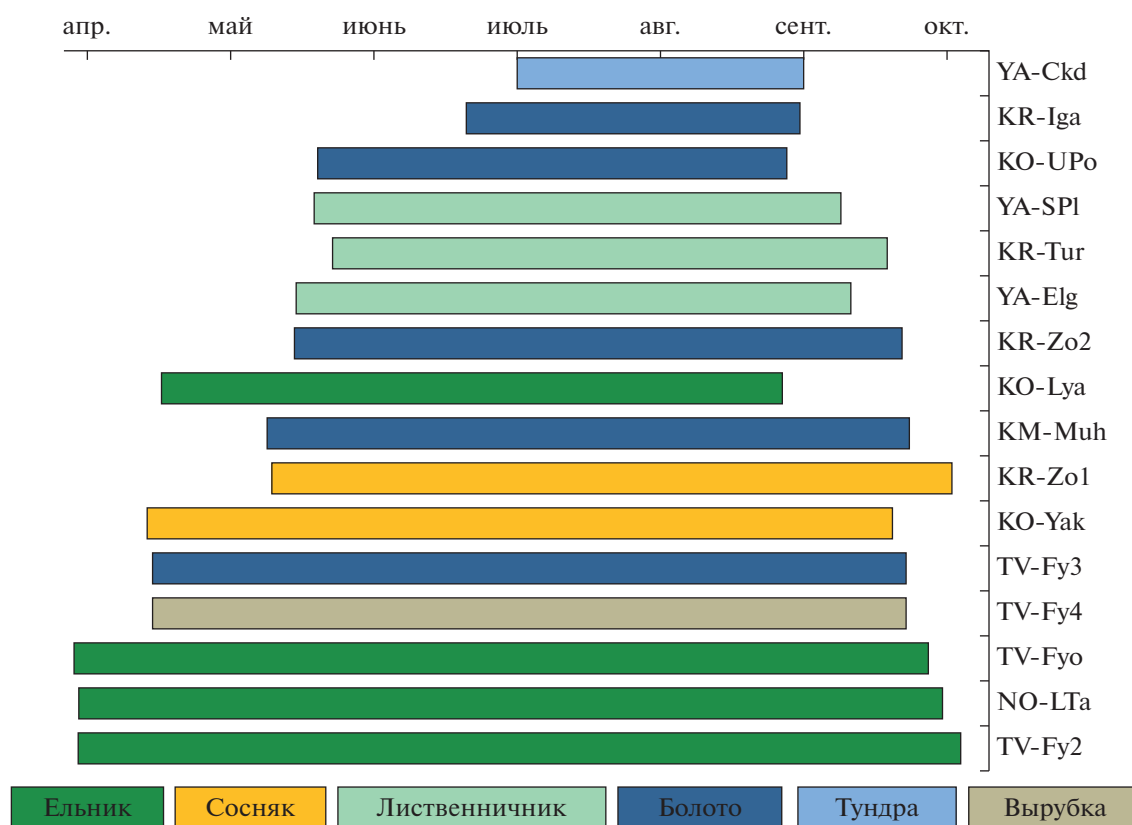


Рис. 8. Вегетационный сезон на станциях сети RuFlux.

таежному (YA-Elg). Средним разбросом значений характеризовались станции на болоте в лесотундре (KR-Iga) и в тундре (YA-Ckd), а также облесенное болото Средней Сибири (KR-Zo2). Слабый разброс и низкие значения *NEE* в июле (значительный сток) отмечен для сосняка лишайникового Средней Сибири (KR-Zo1). Среди всей выборки наиболее сильное нетто-поглощение в середине лета выявлено в высокопродуктивном листоветничнике (YA-Elg).

Среднее суточное значение июльского *NEE* и стандартное отклонение значений по всем дням июля для лесов (TV-Fyo, TV-Fy2, NO-LTa, KO-Lya, KR-Zo1, KR-Tur, YA-SPl, YA-Elg), оказалось равно -1.55 ± 0.76 г С/(м² сут), среднее значение для болот (TV-Fy4, KM-Muh, TO-Plt, KR-Zo2) составило -1.40 ± 0.40 г С/(м² сут). Средние значения для лесов и болот не отличались значимо (*U*-критерий Манна–Уитни, $p = 0.05$). При этом разброс суточных значений в июле для болот по имеющейся выборке в 2 раза ниже, чем в лесах (различие дисперсий по *F*-тесту также не значимо при $p = 0.05$). Частично это может быть связано с меньшим количеством станций-лет в выборке по болотам ($n = 11$) по сравнению с лесами ($n = 22$). Разброс суточных значений *NEE* для июля на станции с наибольшими вариациями *NEE* – вы-

рубке TV-Fy3 (± 2.99 г С/(м² сут)) – более чем в 6 раз превышает разброс на станции с наиболее стабильным *NEE* в середине лета, т.е. на болоте в Мухрино KM-Muh (± 0.43 г С/(м² сут)).

NEE в зимнее время

Для оценки средних величин и изменчивости *NEE* в середине зимы были построены средние суточные и стандартные отклонения *NEE* в январе на разных станциях (рис. 9б). Абсолютная величина *NEE* снижалась с усилением суровости зим с величин 0.4–0.65 г С/(м² сут) в ельниках Европейской территории России до близких к нулю величин в листоветничниках Якутии при средних январских *T* ниже -35°C .

В ельниках Европейской территории России (KO-Lya, TV-Fyo, TV-Fy2) в январе при оттепелях ЭКС фиксировали отрицательные значения *NEE* (сток CO₂), зависевшие от фотосинтетически активной радиации и *T*. Несмотря на преобладание зимой экосистемной эмиссии CO₂, сильно зависящей от *T*, в относительно теплые зимы баланс CO₂ TV-Fyo и KO-Lya смещался в сторону поглощения. Сравнение потоков CO₂ на TV-Fyo, полученных зимой 2015/2016 гг., когда средняя *T* была близка к норме, и в аномально теплую зиму

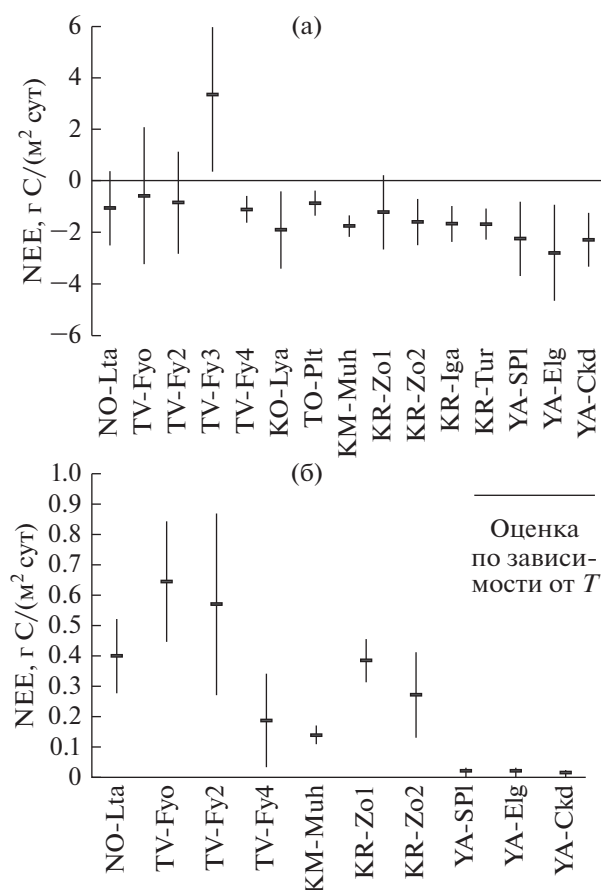


Рис. 9. Среднесуточная величина чистого экосистемного обмена CO_2 (NEE) на каждой станции за июль (а) и январь (б).

Примечание: Среднее показано черточкой, “усами” – стандартные отклонения по всем значениям всех дней в нескольких выбранных месяцах. Станции слева направо расположены по снижению средней годовой температуры воздуха.

2019/2020 гг. с отсутствием устойчивого снежного покрова показало, что положительная аномалия T зимой привела к достоверному увеличению соотношения GPP/TER в ельнике (Mamkin et al., 2022).

Для станции KR-Iga в период активного снеготаяния (третья декада мая–начало июня) и вплоть до полного схода снежного покрова средняя величина эмиссии CO_2 составляла $0.42 \text{ г C/m}^2 \text{ сут}$, что может быть связано с всплесками дыхания почв и высвобождением CO_2 при оттаивании. В пихтарнике в Зотино средняя величина NEE в зимний период (октябрь–апрель) достигала $0.6 \text{ г C/m}^2 \text{ сут}$.

Для экосистем Средней Сибири зимние оценки эмиссии CO_2 по МТП оказались на 75–80% ниже оценок, полученных камерным и градиентным методами (Панов и др., 2021*). Причина расхождений, вероятно, заключается в невыполнении допущений МТП в условиях стабильной

стратификации атмосферы при низкой зимней T . Для получения зимних оценок с помощью МТП при низких T требуется тщательный анализ условий турбулентности, также желательна верификация зимнего дыхания, полученного с помощью МТП, с помощью камерных методов.

NEE в зимний период, с октября по апрель, на станции YA-SPI оценивался всего лишь в $20 \text{ г C/(m}^2 \text{ сезон)}$ (Dolman et al., 2004*) или $35 \text{ г C/(m}^2 \text{ сезон)}$ (Takata et al., 2017*) из-за очень низких зимних T (среднее суточное значение за весь холодный сезон составит $0.10\text{--}0.17 \text{ г C/m}^2$). При этом в декабре–феврале экосистемный поток CO_2 близок к нулю (Dolman et al., 2004*; Takata et al., 2017*).

Влияние факторов среды на NEE . Влияние факторов среды на NEE было неоднозначным и различалось в разных экосистемах, даже расположенных близко, в первую очередь вследствие того, что величина NEE является результирующей двух разных процессов – продукции экосистемы (GPP) и ее дыхания (TER). На эти процессы оказывают влияние различные факторы среды: TER в первую очередь зависит от T и влажности почвы (в заболоченных экосистемах – от уровня грунтовых вод, в мерзлотных – от протаивания сезонного талого слоя); GPP – от освещенности и T .

В лесах Европейской территории России в вегетационный период увеличение T могло привести и к снижению, и к увеличению NEE в зависимости от условий увлажнения. Весеннее увеличение T , когда влаги в почве достаточно, приводило к усилению стока заболоченного ельника TV-Fyo. Летом, если рост T сопровождался увеличением P , то величина NEE ельников NO-LTa и TV-Fyo также снижалась (экосистемы смещались в сторону большего стока CO_2). Небольшие положительные аномалии T приводили к усилению поглощения CO_2 в ельниках TV-Fyo и TV-Fy2 (Mamkin et al., 2022). При низком уровне грунтовых вод увеличивалась эмиссия CO_2 из почвы в TV-Fyo. В сухих и жарких условиях одного и того же 2016 г. NEE TV-Fy2 снизился и ельник стал стоком вместо источника, а NEE KO-Lya при дефиците P и высокой T в начале вегетации, наоборот, сместился от значительного стока к не такому большому в целом за вегетационный сезон. При среднесуточной T воздуха выше 27°C (аномально жаркие летние условия) ельник NO-LTa становился источником CO_2 (Замолодчиков и др., 2017*). В экстремально засушливое лето 2010 г. NEE снижался (экосистема становилась стоком CO_2 вместо источника) при увеличении объемной влажности почвы с 5 до 20%, при этом в периоды с обычным увлажнением такой зависимости не было выявлено (Замолодчиков и др., 2017*). При среднесуточной T от 10 до 20°C сток CO_2 в экосистеме NO-LTa был максимален (Замолодчиков и др., 2017*). Параболическая температурная зависи-

мость стока была также показана для тундры на станции Лаврентия (Zamolodchikov et al., 2003*): минимальный сток наблюдался как в наиболее холодный, так и в самый теплый год измерений. На протяжении вегетационного периода интенсивность NEE в экосистеме KR-Zo1 возрастала пропорционально росту T , с пиковыми значениями NEE в конце июня—начале июля.

Величина стока в лиственничниках (KR-Tur, YA-SPI, YA-Elg) с середины июля начинала снижаться в связи с сезонным протаиванием многолетнемерзлых пород и ростом почвенного эмиссионного потока CO_2 в атмосферу. В засушливые годы NEE лиственничников YA-SPI и YA-Elg был максимальным в июне (в начале вегетации), а не в июле (Maximov et al., 2019). Переход от ассимиляции углерода растительным покровом KR-Tur к его выделению отмечался при понижении среднесуточной T до $+5^\circ C$. Очень влажный год привел к пожелтению хвои лиственниц на станции YA-SPI (Iwasaki et al., 2010*).

Сток CO_2 в северотаежные и среднетаежные лиственничники был выше, чем у ельников Европейской территории России, несмотря на сокращение вегетационного сезона до 3,5 мес. по сравнению с 6–7 мес. у ельников. Анализ соотношения TER и GPP в этих экосистемах дает объяснение, почему лиственничники Восточной Сибири были большими стоками CO_2 , чем ельники Европейской территории России даже за те годы измерений, когда ельники были слабонарушенными. Во-первых, фотосинтез лиственничников в тех же условиях более интенсивный, чем у елей (Yugodskaya et al., 1997*) и, во-вторых, почвенное дыхание в сумме за год ниже у экосистем Сибири по сравнению с Европейской территорией России (Максимов, 2007*). В сумме за вегетационный сезон дыхание ниже вследствие более короткого вегетационного сезона, а в зимний период — вследствие значительно более низких зимних T .

Переключение болот TV-Fyo и KR-Iga от стока CO_2 к источнику произошло вследствие очень сухих и теплых условий. При этом теплые вегетационные сезоны, в которые выпадало достаточно осадков для поддержания высокого уровня грунтовых вод, обеспечивают большое нетто-поглощение CO_2 в болотах и заболоченных лесах (Alekseychik et al., 2017; Arneth et al., 2002*; Kurbatova et al., 2008, 2009; Mamkin et al., 2023). Низкие зимние T ведут к снижению суммарной эмиссии CO_2 болот в зимнее время. Так, вместе со снижением зимних T снижалась эмиссия CO_2 на верховом болоте Красноярского края по сравнению с верховым болотом в Тверской области (Arneth et al., 2002*).

Возможность прогнозов баланса углекислого газа и площадных оценок с помощью данных станций RuFlux

Продолжение измерений на станциях сети RuFlux, дальнейшее обобщение и анализ данных мониторинга позволит делать прогнозы изменений сумм и сезонного хода NEE на основе анализа зависимостей NEE от факторов среды, а также региональные и национальные оценки баланса CO_2 природных экосистем. Для прогнозов требуются достаточно длительные ряды наблюдений, а для площадных оценок — накопление данных по пространству, в разных типах экосистем. Ниже представлены примеры уже опубликованных работ по прогнозам и площадным оценкам по станциям России, а также перспективные направления развития сети мониторинга RuFlux.

Прогнозы баланса углекислого газа. С помощью данных по МТП получены прогнозы баланса углекислого газа для некоторых станций. Карелин и др. (2020) прогнозируют превращение елового леса в Новгородской области NO-LTa из стока в источник углерода для атмосферы при увеличении площади, занятой распадающимися древостоями, до 27%. Засушливые и жаркие годы часто приводят к массовой гибели елей (Карелин и др., 2020). Волны жары будут усиливаться с потеплением климата (IPCC, 2021*); весьма вероятно усиление тенденций массовой гибели ельников (Yuste et al., 2019*), являющихся самыми распространенными типами лесов на Европейской территории России.

Два ельника в Тверской области, различающихся условиями почвенного увлажнения (TV-Fyo, TV-Fy2), показывали различный отклик на жаркие и засушливые условия (Mamkin et al., 2022), а также противоположные многолетние тренды. Таким образом, необходимо учитывать локальные условия почвенного увлажнения при прогнозе баланса углерода лесных экосистем в условиях современных изменений климата.

При прогнозируемом потеплении одновременно с увеличением количества осадков в таежной зоне (IPCC, 2021*) болота и заболоченные леса будут становиться более интенсивным стоком CO_2 из атмосферы [по (Kurbatova et al., 2008)], однако изменения углеродного баланса будут зависеть от соотношения P и суммарного испарения (Helbig et al., 2020*). Ключевым параметром для прогноза углеродного баланса болот и заболоченных лесов является уровень грунтовых вод.

Учитывая увеличение лет с экстремальными погодными условиями (IPCC, 2021*), усиление таяния многолетней мерзлоты, повышение частоты лесных пожаров и увеличение площади перестойных лесов, можно с большой уверенностью говорить о существенном изменении круговоротов углерода и воды в мерзлотных экосистемах при

прогнозируемом потеплении климата. Продукционный процесс лиственных лесов Сибири в условиях потепления климата будет в основном лимитирован эндогенными факторами — устьичной проводимостью, а также экзогенными — обеспеченностью растений влагой и элементами минерального питания, особенно азотом (Максимов, 2007*).

Площадные оценки. Первая попытка вычисления баланса углекислого газа экосистем России с помощью данных по МТП предпринята А. Долманом с соавторами в 2012 г. (Dolman et al., 2012). Для моделирования баланса было выделено девять типов поверхности: 1) тундры, 2) болота, 3) травянистые сообщества, 4) агроценозы, 5) лиственные леса, 6) сосняки, 7) ельники, 8) пихтарники, 9) смешанные и другие леса. Для каждого типа поверхности была взята оценка *NEE* по наблюдениям на ЭКС; так как использовались данные 14 станций измерений, на каждый тип поверхности приходилось всего лишь 1–2 станции. Для лесов сделана поправка на средний возраст лесообразующей породы. Авторы комментируют обоснованность своей оценки так: “Мы сознаем, что оценка биосферного стока в России по 14 станциям измерений потоков является скорее большим предположением, к которому нужно относиться с осторожностью” (Dolman et al., 2012, р. 5331). С точки зрения поглощения ПГ было выделено три группы экосистем (Dolman et al., 2012): болота, аккумулирующие от 50 до 90 г С/(м² год), травянистые сообщества, поглощающие от 125 до 170 г С/(м² год) и леса, в которых баланс углекислого газа изменялся в широких пределах. В семи лесных экосистемах нетто-поглощение варьировало от 0 до 300 г С/(м² год) (Dolman et al., 2012).

Анализ данных станций сети RuFlux по состоянию на 2022 г. выявляет ограничения оценок (Dolman et al., 2012), касающиеся входных данных для моделирования баланса ПГ по площади страны. Например, для еловых лесов были использованы данные двух ельников Тверской области, расположенных в нескольких километрах друг от друга (TV-Fy0, TV-Fy2). В настоящем исследовании на основе многолетних данных уже по четырем средне- и южнотаежным ельникам Европейской территории России (TV-Fy0, TV-Fy2, NO-LTa, KO-Lya) показано, что *NEE* ельников отличался большой межгодовой изменчивостью и в трех случаях из четырех — нестационарностью вследствие природных нарушений и изменений природной среды. Таким образом, эти станции нельзя рассматривать как репрезентативные для всех еловых лесов, требуется анализ причин трендов *NEE* и связи потоков с интенсивностью нарушений. В работе (Dolman et al., 2012) были использованы данные двух станций в тундре, которые представляли умеренный сток CO₂. Однако обоб-

щение результатов многих станций измерений показывает, что тундры могут выступать как стоком, так и источником CO₂ (Замолотчиков, 2015*; Karelin et al., 2013*). По состоянию на 2022 г. сеть RuFlux включает только одну станцию в тундре. Тем не менее, существуют результаты измерений *NEE* как минимум на пяти станциях, функционировавших ранее (Карелин, Замолотчиков, 2008*; Karelin et al., 2013*), а также в настоящее время действуют не менее пяти станций ЭКС (3 станции в районе пос. Черский, в дельте Лены на о. Самойловский, в Тикси), не вошедших в сеть RuFlux. Для мониторинга потоков ПГ в условиях современных быстрых и неоднородных в пространстве изменений климата в Арктике крайне желательно включение в сеть RuFlux станций в тундрах Европейской территории России, Западной и Средней Сибири.

Нетто-поглощение CO₂ лиственными лесами Якутии, основанное на данных нескольких станций по МТП (в том числе YA-SPI), а также авиационных измерений потоков ПГ, оценено в 180 млн т С в год (Maximov et al., 2019), что, возможно, не является верхней границей и может варьировать от года к году (Dolman et al., 2004*). Годовое нетто-поглощение всех лиственных лесов России оценено в 450–617 млн т С/год при общей площади этих лесов в России, равной 257.1 млн га (Maximov et al., 2019). Эта оценка базируется на данных нескольких станций по МТП, работавших ранее и продолжающих работать сейчас на левом и правом берегу р. Лена, и оценок потоков ПГ по данным авиационных измерений. Аргументами в пользу обоснованности этой оценки в случае лиственных лесов России служат, во-первых, устойчивость стока CO₂ в лиственных лесах по данным уже более 30 станций-лет наблюдений, и, во-вторых, использование инвентаризационных многолетних данных древостоя, по ботаническим показателям, а также по запасу углерода в почве и древесине, типичного для усредненного лиственного леса в 29 регионах России (по данным масштабных самолетных исследований).

Для более надежных площадных оценок поглощения CO₂ из атмосферы всей территорией России в первую очередь требуется охватить измерениями экосистемы южных регионов Европейской и Азиатской территории России (полупустыни, степи, горные территории), а особенно агроценозы зернового пояса и заброшенные сельскохозяйственные угодья. Развитие сети мониторинга экосистемных потоков ПГ требуется и в субарктических и арктических биоклиматических зонах, на долю которых приходится значительная доля территории РФ: тундре, лесотундре, редколесьях северной тайги и горных экосистемах высоких широт — Урала, Средней и Восточной Сибири, Дальнего Востока. В северотаежной

подзоне климат становится более благоприятным для произрастания лесов и сток CO_2 в экосистемы может усиливаться. В мерзлотных экосистемах, напротив, учащение лесных пожаров и нашествий насекомых, усиление термокарстовых процессов может приводить к большим выбросам углерода.

Природные и антропогенные нарушения резко меняли характер чистого экосистемного обмена CO_2 лесов с атмосферой. Во-первых, значительно увеличивалась межгодовая изменчивость баланса; во-вторых, NEE экосистем смещался в положительную сторону, т.е. от стока к источнику CO_2 для атмосферы (Karelin et al., 2021; Knohl et al., 2002*). Как и следовало ожидать, кардинальная сплошная рубка леса сильно влияет на баланс CO_2 , превращая экосистему в сильный источник CO_2 в первые несколько лет после нарушения (Mamkin et al., 2019a, b). Таким образом, при анализе углеродного баланса территорий очень важно учитывать природные и антропогенные нарушения. Необходимо расширение сети RuFlux за счет включения нарушенных экосистем, в том числе после пожаров и на деградирующей многолетней мерзлоте.

В будущем площадные оценки могут быть уточнены на основе новой информации, полученной на станциях сети RuFlux.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании впервые представлены обобщенные оценки чистого экосистемного обмена CO_2 различных экосистем на территории России, полученные на конец 2022 г. на станциях мониторинга ПГ по методу турбулентных пульсаций. В течение последних 25 лет в рамках исследований научных коллективов институтов РАН происходило развитие локальных и региональных наблюдений за экосистемными потоками ПГ. Существующая инструментальная база, программное обеспечение, подходы к интерпретации результатов наблюдений на действующих эколого-климатических станциях стандартизированы в соответствии с рекомендациями международного сообщества. Стандартизация методики позволила рассматривать имеющиеся на территории России станции мониторинга потоков ПГ в экосистемах как основу для развития национальной российской сети — RuFlux — в рамках реализации ВИП ГЗ НОЦ “Углерод в экосистемах: мониторинг”. В 2023 г. в сеть планируется включить 22 станции, измерения на которых позволят получить оценки потоков основных ПГ в репрезентативных наземных экосистемах различных природных зон. Мониторинг потоков ПГ осуществляется по методу турбулентных пульсаций, который представляет собой единственный ин-

струмент прямых оценок баланса ПГ земной поверхности с атмосферой на масштабе экосистем.

По состоянию на осень 2022 г., 86% станций сети RuFlux расположено в лесных и болотных экосистемах, в основном в подзонах средней и южной тайги. Несмотря на то, что сеть RuFlux охватывает широкий спектр климатических, почвенных и растительных условий, для повышения ее репрезентативности для территории России требуется включение действующих и создание новых станций в тундровых, северо-таежных, лесостепных, степных и полупустынных экосистемах, в агроценозах, на зарастающих полях, на нарушенных лесных территориях. Одну из возможностей для расширения RuFlux представляет собой сеть карбоновых полигонов, развивающаяся с 2020 г., на которых также предполагаются непрерывные наблюдения за экосистемными потоками ПГ на основе метода турбулентных пульсаций. Благодаря реализации новых эколого-климатических государственных программ мониторинговыми исследованиями нетто-потоков ПГ в ближайшем будущем планируется охватить широкий спектр наземных экосистем, расположенных в различных климатических условиях.

Анализ многолетних рядов наблюдений показал, что почти все исследованные естественные ненарушенные экосистемы в России являются стоком CO_2 для атмосферы с диапазоном средних годовых оценок 80–240 г $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ год})$ в разных экосистемах. Изменения климата, межгодовая изменчивость погодных условий и естественные нарушения (пожары, ветровалы, гибель деревьев из-за вредителей, деградация многолетней мерзлоты и пр.) приводят к трансформации углеродного баланса экосистем, являются причиной увеличения межгодовой изменчивости и обуславливают наличие долговременных трендов основных компонентов углеродного баланса. Антропогенные нарушения (сплошная рубка) резко смещают баланс углерода лесной экосистемы в сторону выделения CO_2 в атмосферу.

В контексте реализации стратегии низкоуглеродного развития РФ требуются оценки роли природных экосистем в балансе ПГ на территории России, основанные на более представительном экспериментальном материале. Развитие сети мониторинга потоков ПГ в строгом соответствии с профессиональными методическими рекомендациями позволит создать новый инструмент для оценки газообмена наземных экосистем с атмосферой. Дальнейшее обобщение имеющихся результатов и расширение сети RuFlux позволит получать обоснованные прогнозы реакции экосистем на изменения климата и природной среды. Оценки потоков ПГ, получаемые при помощи метода турбулентных пульсаций, могут быть использованы при калибровке и вери-

фикации моделей и данных дистанционного зондирования. Данные сети RuFlux могут быть востребованы профильными научными организациями, структурами Росгидромета, Министерства природных ресурсов и экологии, а также Министерства экономического развития в качестве фактического материала для верификации и оценки бюджета углерода на уровне страны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках 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). Работы в Институте географии РАН (Москва) были выполнены Д.В. Карелиным в рамках темы ГЗ FMGE-2019-0006 (моделирование). Работа в Республике Саха (Якутия) выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту “Исследование биогеохимических циклов и адаптивных реакций растений бореальных и арктических экосистем северо-востока России” (код научной темы: FWRS-2021-0024; номер гос. регистрации в ЕГИСУ: AAAA-A21-121012190034-2; руководитель: д.б.н. Максимов Т.Х.) и с применением оборудования ЦКП ФИЦ “ЯНЦ СО РАН” (грант № 13.ЦКП.21.0016): инфракрасный газоанализатор CO₂ и паров воды Li-7500 открытого типа (LI-COR), портативный инфракрасный газоанализатор EGM-4 (PP-System). Работы Югорского государственного университета выполнены на карбоновом полигоне “Мухрино” ФГБОУ ВО “ЮГУ” в рамках пилотного проекта Минобрнауки России по созданию на территории регионов России карбоновых полигонов для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса, реализуемого на основании Приказа Минобрнауки России от 5 февраля 2021 г. № 74 “О полигонах для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса” (с изменениями от 21.01.2022), а также при поддержке гранта Правительства Тюменской области в соответствии с программой Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня в рамках национального проекта “Наука”. Соглашение № 94-ДОН/05.5/20-ЮГУ-231 от 14.12.2020. Работа В.В. Мамкина (обработка данных пульсационных наблюдений в ЦЛГПБЗ, Тверская область) выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1022031600002-1-1.6.19). Работы для станций TV-Fy0 и TV-Fy2 выполнялись при поддержке гранта РНФ 21-14-00209.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность С.П. Швецову, С.Н. Кузину (ИБ Коми научного центра УО РАН), С.В. Титову, Р.А. Колосову, А.А. Цуканову (ИЛ СО РАН) за техническое обслуживание оборудования; Р.Е. Петрову (ИБПК СО РАН), Д.Г. Иванову (ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН), И.В. Железновой (МГУ им. М.В. Ломоносова) за помощь в подготовке статьи.

FUNDING

The research was carried out as part of the most important innovative project of national importance “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (registration no. 123030300031-6). The work at the Institute of Geography RAS was carried out by D.V. Karelin in the framework of the state assignment FMGE-2019-0006 (modelling). The work in the Republic of Sakha (Yakutia) was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the project “Study of biogeochemical cycles and adaptive reactions of plants in boreal and arctic ecosystems of the north-east of Russia” (scientific theme code: FWRS-2021-0024; state registration no. AAAA-A21-121012190034-2; supervisor: Maximov T.Kh., Doctor of Biological Sciences) and using the equipment of the Central Collective Use Center of the Federal Research Center “YaNC SB RAS” (grant no. 13.TsKP.21.0016): an infrared open type gas analyzer for CO₂ and water vapor Li-7500 (LI-COR), portable infrared gas analyzer EGM-4 (PP-System). The work of Yugra University was carried out at the Mukhrino carbon polygon of the Yugra University as part of a pilot project of the Russian Ministry of Education and Science to create carbon polygons in the regions of Russia for the development and testing of carbon balance control technologies, implemented on the basis of the Order of the Russian Ministry of Education and Science of February 5, 2021 No. 74 On Carbon Polygons for the Development and Testing of Technologies of the Control of Carbon Balance (as amended on January 21, 2022), as well as with the support of the grant from the Government of Tyumen oblast in accordance with the program of the West Siberian Interregional Scientific and Educational Center of the World Level within the framework of the national project “The Science.” Agreement no. 94-DON/05.5/20-YUGU-231 dated December 14, 2020. The work of V.V. Mamkin (eddy covariance data processing from Tverskaya oblast) was supported by the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme no. 1022031600002-1-1.6.19). The study for TV-Fy0 and TV-Fy2 sites has been supported by the grant of the Russian Science Foundation (no. 21-14-00209).

ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their deep gratitude to S.P. Shvetsov, S.N. Kuzin (Institute of Biology of the Komi Science Centre of the UB of the RAS), S.V. Titov, R.A. Kolosov, A.A. Tsukanov (Sukachev Institute of Forest of the SB of the RAS) for the maintenance of the equipment; to R.E. Petrov (Institute for Biological Problems of Cryolithozone of the SB of RAS), D.G. Ivanov (Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS), I.V. Zheleznova (Lomonosov Moscow State University) for the assistance in preparing this manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ⁶

- Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авиллов В.К., Мамкин В.В. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. М.: ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 2016. 223 с.
- Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Шилкин А.В., Куманяев А.С., Попов С.Ю., Тельнова Н.О., Гитарский М.Л. Влияние прогрессирующего распада древостоя на углеродный обмен еловых лесов // ДАН. Сер. наук о Земле. 2020. Т. 493. № 1. С. 89–93.
- Чебакова Н.М., Выгодская Н.Н., Арнет А., БелеллиМаркезини 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.
- Alekseychik P., Mammarella I., Karpov D., Dengel S., Terentiev I., Sabrekov A., Glagolev M., Lapshina E. Net ecosystem exchange and energy fluxes measured with eddy covariance technique in a West Siberian bog // Atmospheric Chem. and Phys. 2017. Vol. 17. P. 9333–9345. <https://doi.org/10.5194/acp-2017-43>
- Baldocchi D.D. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology // Global Change Biology. 2020. Vol. 26. № 1. P. 242–260.
- Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., van der Molen M.K., 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. Vol. 9. № 12. P. 5323–5340.
- Heimann M. The EUROSIBERIAN CARBONFLUX project // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2002. Vol. 54. № 5. P. 417–419.
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Popov S.Y., Kumanyaev A.S., de Gerenyu V.O., Tel'nova N.O., Gitar'skiy M.L. The effect of tree mortality on CO₂ fluxes in an old-growth spruce forest // European J. of Forest Research. 2021. Vol. 140. № 2. P. 287–305.
- Kurbatova J., Li C., Varlagin A., Xiao X., Vygodskaya N. Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia // Biogeosciences. 2008. Vol. 5. P. 969–980.
- Kurbatova J., Li C., Tatarinov F., Varlagin A., Shalukhina N., Olchev A. Modeling of the carbon dioxide fluxes in European Russia peat bogs // Environmental Research Lett. 2009. Vol. 4. № 4. P. 045022.
- Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Varlagin A., Yaseneva I., Olchev A. Energy and CO₂ exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the Southern Taiga // Agric. For. Meteorol. 2019a. Vol. 265. P. 252–268.
- Mamkin V.V., Mukhartova Y.V., Diachenko M.S., Kurbatova J.A. Three-year variability of energy and carbon dioxide fluxes at clear-cut forest site in the European southern taiga // Geography. Environment, Sustainability. 2019b. Vol. 12. № 2. P. 197–212.
- Mamkin V., Varlagin A., Yaseneva I., Kurbatova J. Response of Spruce Forest Ecosystem CO₂ Fluxes to Inter-Annual Climate Anomalies in the Southern Taiga // Forests. 2022. Vol. 13. № 7. P. 1019. <https://doi.org/10.3390/f13071019>
- Mamkin V., Avilov V., Ivanov D., Varlagin A., Kurbatova J. Interannual variability of the ecosystem CO₂ fluxes at paludified spruce forest and ombrotrophic bog in southern taiga // Atmospheric Chem. and Phys. 2023. Vol. 23. № 3. P. 2273–2291. <https://doi.org/10.5194/acp-23-2273-2023>
- Maximov T.C., Maksimov A.P., Kononov A.V., Kotani A., Dolman A.J. Carbon Cycles in Forests // Water and Carbon Dynamics / T. Ohta, T. Hiyama, Y. Iijima, A. Kotani, T.C. Maximov (Eds.). Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. P. 69–100. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6317-7>
- Mikhaylov O.A., Zagirova S.V., Miglovet's M.N. Seasonal and inter-annual variability of carbon dioxide exchange at a boreal peatland in north-east European Russia // Mires and Peat. 2019. Vol. 24. № 34. P. 1–16.
- 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., Panfyorov M.I., Tchepakova N., Vygodskaya N.N. Productivity of forests in the Eurosiberian boreal region and their potential to act as a carbonsink – a synthesis // Global Change Biology. 1999. Vol. 5. № 6. P. 703–722.
- Schulze E.-D., Vygodskaya N.N., Tchepakova N.M., Czimeczik C.I., Kozlov D.N., Lloyd J., Mollicone D., Parfenova E., Sidorov K.N., Varlagin A.V., Wirth C. The Eurosiberian transect: An introduction to the experimental region // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2002a. Vol. 54. № 5. P. 421–428.
- Zagirova S.V., Mikhailov O.A., El'sakov V.V. Carbon Dioxide and Water Exchange between Spruce Forest and Atmosphere in Spring–Summer under Different Weather Conditions // Contemporary Problems of Ecology. 2019b. Vol. 12. № 1. P. 45–58.

⁶ References приведены в ДМ_6; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: CTGOHO.

RuFlux: The Network of the Eddy Covariance Sites in Russia

O. A. Kuricheva^{1, *}, V. K. Avilov¹, A. V. Varlagin^{1, **}, M. L. Ginarskiy², A. A. Dmitrichenko³,
 E. A. Dyukarev^{3, 4, ***}, S. V. Zagirova^{5, ****}, D. G. Zamolodchikov^{6, 7, *****}, V. I. Zyryanov⁸,
 D. V. Karelin^{9, *****}, S. V. Karsanaev¹⁰, I. N. Kurganova^{11, *****}, E. D. Lapshina³,
 A. P. Maksimov¹⁰, T. Ch. Maximov^{10, *****}, V. V. Mamkin^{1, 7, *****}, A. S. Marunich¹²,
 M. N. Miglovets⁵, O. A. Mikhailov⁵, A. V. Panov⁸, A. S. Prokushkin^{8, *****}, N. V. Sidenko⁸,
 A. V. Shilkin^{6, 13}, and Yu. A. Kurbatova^{1, *****}

¹Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Russian Energy Agency under the Ministry of Energy of the Russian Federation, Moscow, Russia

³Yugra University, Khanty-Mansiysk, Russia

⁴Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

⁵Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia

⁶Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁷National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

⁸Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences — a separate subdivision of the Federal Research Centre of the Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FRC KSC SB RAS), Krasnoyarsk, Russia

⁹Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹⁰Institute for Biological Problems of Cryolithosphere of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences — a separate subdivision FSBIS Federal Research Centre “Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia

¹¹Institute of Phisicochemical and Biological Problems in Soil Science, RAS, Pushchino, Russia

¹²Valday Branch of State Hydrological Institute, Valday, Russia

¹³Scientific and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Russia

*e-mail: olga.alek.de@gmail.com

**e-mail: varlagin@sevin.ru

***e-mail: dekot@mail.ru

****e-mail: zagirova@ib.komisc.ru

*****e-mail: dzamolod@cepl.rssi.ru

*****e-mail: dkarelin7@gmail.com

*****e-mail: ikurg@mail.ru

*****e-mail: tcmam@mail.ru

*****e-mail: vadmamkin@gmail.com

*****e-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru

*****e-mail: kurbatova.j@gmail.com

For the first time, the information is summarized on the history of establishment, the state of observations and the main scientific results on sites included in RuFlux, the Russian eddy covariance network for the monitoring of greenhouse gases (GHG). Eddy covariance technique provides estimates of GHG fluxes at the level of ecosystems. The long-term series of GHG fluxes (more than 190 site-years of observations) have been obtained. Up to the end of 2022, 86% of the sites of the RuFlux network are located in forests and wetlands, 77% of all sites are in the middle and southern taiga. Almost all undisturbed ecosystems in Russia are the sinks of CO₂ from the atmosphere with a range of average annual estimates of net absorption from 80 to 240 g C m⁻² yr⁻¹. The GHG balance is determined by a complex of abiotic and biotic factors. The average long-term net CO₂ absorption is higher in permafrost Siberian larch forests than in European spruce forests. When moving from west to east, the intensity of CO₂ sink in the middle of summer increases, and the emission of CO₂ in the middle of winter decreases sharply. Natural and anthropogenic disturbances lead to the transformation of the carbon balance by increasing the release of CO₂ into the atmosphere. RuFlux network covers a wide range of types of ecosystems, but it is needed to organize more GHG sites in tundra, northern taiga, forest-steppe, steppe, and semi-deserts; in the ecosystems disturbed by humans (including fields) and in the ecosystems with successions caused by natural disturbances.

Keywords: eddy covariance method, ecosystems, net ecosystem exchange, measurement network, ecoclimatic sites, monitoring