

На правах рукописи

Куричева Ольга Алексеевна

**ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОТОКИ
ТЕПЛА, ВЛАГИ И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА
В ТРОПИЧЕСКОМ МУССОННОМ ЛЕСУ ЮЖНОГО ВЬЕТНАМА**

03.02.08 – «Экология»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Лаборатории биогеоценологии им. В.Н. Сукачева Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук

**Научный
руководитель:**

Юлия Александровна Курбатова, кандидат биологических наук, доцент, и.о. зав. Лабораторией биогеоценологии им. В.Н. Сукачева ФГБУН Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН

**Официальные
оппоненты:**

Игорь Александрович Шульгин, доктор биологических наук, профессор Кафедры метеорологии и климатологии Географического факультета ФГБОУ Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Анатолий Станиславович Прокушкин, кандидат биологических наук, заведующий Лабораторией биогеохимических циклов в лесных экосистемах ФГБУН Института леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения РАН

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения РАН

Защита состоится « » декабря 2014 года в .00 на заседании диссертационного совета Д 002.213.01 при ФГБУН Институте проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН по адресу: 119071, Москва, Ленинский проспект, д. 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Отделения биологических наук РАН по адресу 119071, Москва, Ленинский проспект, д. 33.

Автореферат разослан « » октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.б.н.

Елена Александровна Кацман

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Природные экосистемы обмениваются с атмосферой потоками тепла, влаги и различными газовыми химическими соединениями, воздействуя на локальный, региональный и глобальный климат (Пианка, 1981; Adams, Zeng, 2007; Yasunari, 2007; Bonan, 2008). Исследования, связанные с энерго- и массообменом (ЭМО) между наземными экосистемами и атмосферой, приобрели в последние годы особую актуальность в связи с глобальными изменениями климата. Изменения климата связывают с ростом концентрации парниковых газов антропогенного происхождения (IPCC, 2007). Роль наземной биоты в поглощении/выделении парниковых газов, географическое распределение стоков/источников углекислого газа, чувствительность ЭМО к климатическим изменениям остаются дискуссионными вопросами современных экологических исследований (IPCC, 2013).

Лесные экосистемы благодаря высокой биомассе и продуктивности отличаются интенсивным обменом углекислого газа с атмосферой по сравнению с другими биомами (Malhi et al., 1999; Falge et al., 2002; Clark, 2004; Granados, 2006; Luysaert et al., 2008 и др.). Особая роль принадлежит тропическим лесам, которые содержат в биомассе и почве около половины органического вещества всех наземных экосистем и создают треть первичной продукции (Malhi, 2012).

Активно вегетируя в течение всего года, тропические леса получают и перерабатывают наибольшее количество солнечной радиации, тепла и влаги среди всех наземных экосистем. К 2000 г. около половины первичных тропических лесов Земли было сведено и преобразовано во вторичные обедненные растительные сообщества (Sommer, 1976; ИТТО, 2002). В развивающихся странах Юго-Восточной Азии с высокой плотностью населения доля площадей, покрытых лесом, снизилась до критических отметок. Во Вьетнаме в доиндустриальную эпоху лесом было покрыто, предположительно, около 80 % территории, в 1940-х гг. – 45 % (Maurand, 1943; Руднев, 2003); после того, как в начале 1990-х гг. эта величина снизилась до 28 %, были приняты срочные меры по лесовосстановлению. Начавшиеся в 1997 г.

правительственные программы по резкому снижению рубок в естественных лесах и лесовозобновлению (WWF..., 2001) позволили к 2010 г. поднять долю облесенной территории до 44 % (FAO, 2010). Однако 80-90 % лесов в той или иной степени изменены деятельностью человека – действием гербицидов и напалма во время Второй Индокитайской войны, с 1962 по 1975 гг.; выборочными рубками; использованием крупных деревьев для получения смолы (Кузнецов, 2003; Tran Нор et al., 2005; Кузнецов и др., 2010; Millet et al., 2010).

Первичные тропические леса Юго-Восточной Азии – в отличие от восстанавливаемых – имеют высокое, на уровне самых богатых тропических лесов мира, видовое разнообразие и длительную эволюционную историю (Ray and Adams, 2001; Кузнецов, 2003; Кузнецов и Кузнецова, 2011). Сохранившиеся массивы первичных лесов остро нуждаются в охране, так как тропический лес со сложной структурой не возобновляется на месте саванноподобных сообществ, возникших на обширных площадях в результате сведения лесов (Кузнецов и Кузнецова, 2013). Изучение функционирования муссонных (сезонно-влажных) тропических лесов необходимо для управления лесными ресурсами в Юго-Восточной Азии.

Функционирование муссонных тропических лесов Юго-Восточной Азии мало изучено по сравнению с постоянно-влажными тропическими лесами (Seasonally..., 2011; Структура и функции..., 2011). Между тем, метаболизм муссонных лесов значительно отличается от метаболизма постоянно-влажных лесов: малая сумма осадков в сухой сезон является лимитирующим фактором для функционирования биоты сезонно-влажного тропического леса.

Уникальность объекта исследования, необходимость понимания функций экосистемы муссонного тропического леса для управления лесными ресурсами, а также существенное влияние тропических муссонных лесов на климат определяют актуальность данной работы.

Цель диссертационной работы состояла в выявлении специфики энерго- и массообмена (H_2O , CO_2) экосистемы муссонного тропического леса при различных гидрометеорологических условиях.

Задачи работы:

1. Оценка суточной и сезонной динамики, интегральных сумм потоков тепла, H_2O и CO_2 в тропическом муссонном лесу Южного Вьетнама по результатам непрерывных круглогодичных измерений;
2. Выявление основных факторов, обуславливающих динамику потоков тепла, H_2O и CO_2 при различных гидрометеорологических условиях;
3. Выявление особенностей энерго- и массообмена (H_2O , CO_2) муссонного тропического леса юга Вьетнама в сравнении с тропическими экосистемами мира (по данным сети FLUXNET);
4. Оценка взаимосвязей между потоками энергии, воды и CO_2 муссонного тропического леса юга Вьетнама.

Методическая основа и экспериментальные данные. В работе был применен метод пульсационных наблюдений (eddy covariance), широко используемый по всему миру в сети эколого-климатического мониторинга FLUXNET (более 550 станций в 2013 г.). Используемые приборы, установленные на метеорологической вышке высотой 50 м, и методы обработки данных являются стандартными для сети FLUXNET. Анализируемая база экспериментальных данных включала: 1) потоки тепла, влаги и CO_2 , а также метеорологические параметры над лесом, в пологе леса, в почве за три сухих и два влажных сезона (2,5 года измерений) с дискретностью 30 минут; 2) доступные данные о потоках тепла, влаги и CO_2 на станциях в тропических лесах сети FLUXNET.

Расчеты потоков тепла, влаги и CO_2 из 10-герцевых данных были выполнены в программе EddyPro (LI-Cor, США), заполнение пропусков произведено в онлайн-инструменте на сайте Института Макса Планка (Германия) и в программе Flux-Analysis Tool (Япония). Осреднение и статистический анализ данных проводились в программах ABD (А. Дещеревский, Россия) и Statistica (США).

Личный вклад автора. В ходе командировок в Южный Вьетнам обеспечена непрерывная работа измерительного комплекса в национальном парке Кат Тьен в периоды 20.05 – 15.08.2012, 11.11.2012 – 15.03.2013, 18.08.2013 – 17.10.2013.

Организованы дополнительные измерения осадков под пологом леса и просачивания влаги в почву. Сделан обзор мировых работ по теме пульсационных измерений потоков тепла, влаги, CO_2 в тропиках. Проведены расчеты потоков тепла, влаги, CO_2 , заполнение пропусков, осреднение и анализ данных за 2,5 года.

Научная новизна работы. Для муссонного тропического леса Южного Вьетнама впервые получены данные о суточной, сезонной и годовой изменчивости потоков тепла, влаги и CO_2 . Выявлены лимитирующие факторы ЭМО в муссонном тропическом лесу. Впервые показано, что валовая первичная продукция и суммарное испарение сезонно-влажного тропического леса может достигать аналогичных величин для постоянно-влажных лесов, несмотря на наличие длительного сухого сезона, при обилии ресурсов тепла и влаги в годовом цикле и доступности влаги для корней деревьев в сухой сезон. Впервые показано, что муссонный тропический лес может быть большим стоком углерода из атмосферы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Особенности суточного хода облачности в условиях муссонного тропического климата в Южном Вьетнаме приводят к формированию более высокого радиационного баланса, чем в постоянно-влажных тропических лесах.

2. Валовая первичная продукция (*GPP*) и суммарное испарение (*LE*) в сезонно-влажном тропическом лесу юга Вьетнама лежат в пределах современных оценок *GPP* и *LE* для постоянно-влажных тропических лесов мира.

3. Структура теплового баланса муссонного тропического леса юга Вьетнама определяется сезонной динамикой атмосферного увлажнения (с учетом запаздывания за счет буферных свойств почвы для влагообмена).

4. Суммарное испарение муссонного тропического леса юга Вьетнама определяется радиационным балансом, кроме 1-2 самых сухих месяцев года. Испарение снижалось на 20 % в сухой сезон по сравнению с влажным сезоном.

5. Муссонный тропический лес юга Вьетнама был значительным стоком углерода из атмосферы в 2012-2013 годах (около $400 \div 450 \pm 100$ грамм углерода на квадратный метр в год).

Практическая значимость работы состоит в доказательстве значительного влияния первичных полулистопадных муссонных тропических лесов на климат в регионе; доказательстве роли муссонного тропического леса как стока углерода из атмосферы, что важно в контексте глобальных изменений климата. Показано, что в классификации тропических лесов необходимо учитывать функциональный аспект, в частности, годовые суммы ЭМО, а не только климат. Указание на важность учета гидрогеологических характеристик в функционировании сезонно-влажного тропического леса может быть применено для лесоразведения в Юго-Восточной Азии. Получены уравнения связи влажности верхнего горизонта почвы с продолжительностью сухого сезона, а также количественные оценки увеличения засушливости и продолжительности сухого сезона в условиях Эль-Ниньо, что может быть использовано при прогнозировании вероятности лесных пожаров. Инструментальные результаты могут быть использованы для калибровки моделей ЭМО тропических экосистем и атмосферы. Результаты использовались при выполнении планов НИР Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра.

Апробация работы и публикации. Основные положения и выводы диссертации были представлены на Симпозиумах Европейского геофизического сообщества (Австрия, Вена, 2012-2014); на научном семинаре Института Прикладной механики и информатики Вьетнамской Академии Наук и Технологий (ВАНТ) по Инициативному проекту Asia Geo Grid и развитию мониторинга потоков парниковых газов на территории Вьетнама (Вьетнам, Хошимин, 2013); на совместном семинаре Института Тропической Биологии ВАНТ и Центра по исследованию Глобальных изменений Чешской Академии Наук «Обзор состояния пульсационных измерений во Вьетнаме, в т.ч. новые данные со станции в национальном парке Кат Тьен. Фиксация и баланс углерода и влияние глобальных изменений» (Вьетнам, Хошимин, 2012); на международных конференциях сообщества AsiaFlux (Республика Корея, Сеул, 2013; Филиппины, Лос-Банос, 2014); на конференциях молодых сотрудников и аспирантов Института проблем экологии

и эволюции им. А.Н. Северцова «Актуальные проблемы экологии и эволюции в исследованиях молодых ученых» (Россия, Москва, 2012, 2014); на Третьей национальной научной конференции с международным участием «Математическое моделирование в экологии» (Экоматмод-2013) (Россия, Пущино, 2013).

По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 2 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ общим объемом 3,9 п.л.

Благодарности: Администрации и сотрудникам Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра за возможность работы во Вьетнаме и создание условий работы на высоком уровне. Администрации Национального парка Кат Тьен за возможность работы на территории, решение организационных проблем. Научному руководителю Ю.А. Курбатовой за старт вьетнамского проекта по пульсационным измерениям, всестороннюю поддержку и обсуждения. Коллективу Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и в т.ч. коллективу Кафедры метеорологии и климатологии за формирование системного физико-географического взгляда и навыков полевой работы. Э. Галояну за метеорологические данные за 2011 год. А. Дещеревскому за уникальную программу обработки геофизических данных ABD и обсуждение статистических методов обработки данных. Ба Зуй Диню, В. Авилову, А. Новичонку, Е. Новичонок, Фонг Лыу До за совместную работу над сбором пульсационных данных и помощь в сборе данных по перехвату осадков и просачиванию влаги в почву. Н. Куричеву за поддержку, обсуждения и замечания.

Исследования были поддержаны РФФИ, грант 14-04-31973 мол_а «Связь потоков влаги с потоками тепла и CO₂ в тропическом сезонно-влажном лесу Южного Вьетнама» (2014-2015 гг.).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 214 страницах, включающих 38 рисунков и 15 таблиц. 2 приложения содержат 8 рисунков, 1 таблицу. Список источников включает 268 наименований, из них 228 – на английском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы, поставлены цели и задачи.

Глава 1. Исследования энерго- и массообмена тропических лесов в условиях современных изменений климата

В первой главе акцентируется внимание на нарушенности лесов Юго-Восточной Азии, обедненности вторичных сообществ, актуальности лесовосстановления, а также важности изучения функций сохранившихся первичных лесных массивов. Обзор исследований по энерго- и массообмену тропических лесов показывает, что а) муссонные тропические леса слабо изучены относительно постоянно-влажных лесов; б) мало исследований, подробно рассматривающих взаимосвязь потоков энергии, влаги и CO₂ в тропических лесах. Климатические изменения в Южном Вьетнаме за 1980-2010 гг. заключаются в статистически значимом повышении температуры во все месяцы, кроме самых жарких, и увеличении осадков в сухой сезон (Дещеревская и др., 2013).

Глава 2. Объект и метод

2.1. Объект исследования – муссонный тропический лес Национального парка Кат Тьен. Исследование было осуществлено в тропическом сезонно-влажном полулистопадном лесу равнинной юго-восточной части национального парка Кат Тьен, Южный Вьетнам (11,5° с. ш., 107,4° в. д., абсолютная высота 130-150 м). В лесу выделены 3-5 подъярусов; высота полога составляет около 37 м; фоново зафиксировано около 80 видов деревьев, из них преобладающим является вид *Lagerstroemia calyculata* (*Lythraceae*) и виды семейств *Rubiaceae*, *Datiscaceae*, *Caesalpinaceae* (Кузнецов и Кузнецова, 2011). Лес произрастает на темноцветных ферраллитных почвах на вулканических базальтах; почва характеризуется средним содержанием углерода (И.Н. Курганова, личное сообщение) и высоким – азота (Т.Н. Мякшина, личное сообщение) и фосфора (Аничкин, 2008). В пике сухого сезона около половины индивидуальных деревьев верхних подъярусов находятся в безлистном состоянии, почва иссушается, уровень водоемов падает на 4-6 метров.

Лес первичен (никогда не вырубался), однако нарушен (А.Н. Кузнецов, личное сообщение), о чем свидетельствуют и исторические, и ботанические факты (Кузнецов и Кузнецова, 2011; Blanc et al., 2000).

2.2. Метод пульсационных наблюдений и сопутствующие измерения. Для получения данных о потоках тепла, влаги и CO_2 использовались стандартные пульсационные приборы – инфракрасный газоанализатор открытого типа (LI-7500A, LI-Cor, США) и ультразвуковой анемометр (CSAT3, Campbell Scientific, США), измерявшие концентрации CO_2 и H_2O и три компоненты скорости ветра на частоте 10 Гц. Также проводились метеорологические измерения над лесом, в пологе леса и в почве. Достоинством метода пульсационных наблюдений является большой объем данных на экосистемном уровне осреднения. Основным ограничением метода является низкое качество данных о потоках при сильных осадках и в условиях слабой турбулентности, вследствие чего в рядах данных значительна доля пропусков (в Кат Тьене – около 40 % значений для потоков тепла и влаги и 65 % значений для потока CO_2). Поэтому при заполнении пропусков для подсчета месячных и годовых сумм обмена углерода большое внимание уделялось поиску алгоритмов, устойчивых к большой доле пропусков в данных. Помимо стандартных измерений сети FLUXNET, проводились дополнительные измерения осадков под пологом леса, просачивания влаги в почву.

В методе пульсационных наблюдений прямо измеряется только нетто-обмен углерода (*NEE*), но не валовая первичная продукция (*GPP*) и дыхание экосистемы (*Reco*). Выделение *GPP* и *Reco* из *NEE* осуществлялось по стандартному алгоритму аппроксимации ночного дыхания на дневное время по температуре; алгоритм реализуется в скользящем окне (Reichstein et al., 2005). Однако аппроксимация требует дальнейшего уточнения по двум причинам: 1) днем, помимо дыхания почвы, валежа, стволов и ветвей, которое измеряется ночью, существует еще фотодыхание, которое может составлять большую часть от общего дыхания экосистемы; 2) в Кат Тьене в сухой сезон дыхание зависело больше от влажности почвы, чем от температуры.

Глава 3. Обеспеченность климатическими ресурсами: погодные условия и радиационный баланс

Южный Вьетнам характеризуется субэкваториальным климатом (по классификации Б.П. Алисова). Выражены два сезона – сезон дождей (с апреля по октябрь) и сухой сезон (с ноября по март).

3.1. Погодные условия. Наиболее четко сезоны проявляются в различиях увлажнения (Рисунок 1). В 2012 и 2013 гг. 4/5 годовой суммы осадков выпало во влажное полугодие. В сухие сезоны 2012-2013 и 2013-2014 гг. за 4 месяца выпало только 12-14 мм осадков. Сухие сезоны 2012-2014 гг. были 5-м и 4-м в ряду самых засушливых за 1980-2010-е гг. (по сравнению с данными метеостанции Донг Соай).

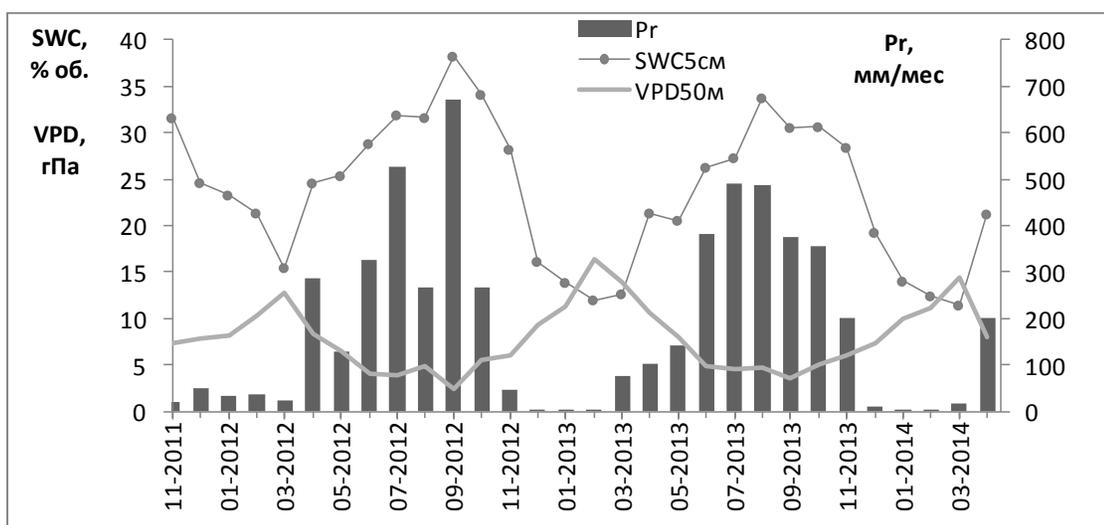


Рисунок 1 – Характеристики влажности за период 11/2011-05/2014: объемная влажность почвы на глубине 5 см (SWC5см), дефицит водяного пара над пологом леса (VPD50м), месячная сумма осадков (Pr)

Самыми прохладными месяцами за период измерений были декабрь-январь ($23,0 \div 24,7$ °C), самыми жаркими – март-май ($27,1 \div 27,5$ °C). В начале сухого сезона ночью температура на высоте 2 м опускалась до $16 \div 18$ °C (температура верхних слоев почвы падала до $18,5 \div 20,0$ °C), а в конце сухого сезона днем поднималась до $35 \div 36$ °C. В пик сезона дождей ночью температура составляла $23 \div 24$ °C, а днем доходила только до $27 \div 28$ °C. Осадки выпадали в основном

ливневые, почти половина суточных осадков в среднем выпадала с 16:30 до 20:30 по местному времени. Средняя за месяц минимальная относительная влажность воздуха во второй половине сухого сезона 2012-2013 и 2013-2014 гг. опускалась до 42 %, объемная влажность верхних 5 см почвы падала до 10 ÷ 12 %, т.е. подходила вплотную к влажности завядания (по литературным данным для суглинистых почв). Средняя скорость ветра даже в самые ветреные месяцы не превышала 2,0 ÷ 2,2 м/с. В пик влажного сезона скорость ветра составляла всего 1,4 м/с.

Сухой сезон 2011-2012 г. оказался на 3 недели короче нормы¹, составляющей 3 месяца 10 дней, и более влажным, вследствие фазы Ла-Нинья крупномасштабного тропического метеорологического явления Эль-Ниньо-Южное Колебание. Сухие сезоны 2012-2013 и 2013-2014 гг., напротив, были на 2-2,5 недели длиннее и значительно засушливее нормы. Самыми засушливыми условиями, неблагоприятными для растений, характеризовались февраль-март 2013 и 2014 года. Влажные сезоны 2012 и 2013 гг. по сумме осадков были близки к норме.

3.2. Радиационный баланс. Радиационный баланс (Rn) – единственный источник энергии в экосистеме – в Кат Тьене (за 2012 г. – 4876 МДж/м², за 2013 г. – 4841 МДж/м²) превышал известные оценки для 12 из 14 тропических станций Юго-Восточной Азии и Амазонии, по которым доступны данные FLUXNET. Rn обладал плавным сезонным ходом (Рисунок 2) и за влажное полугодие был даже немного выше, чем в сухое полугодие, несмотря на увеличение облачности, – в противоположность многим тропическим лесам. Высокий Rn в Кат Тьене был обусловлен большой полуденной высотой солнца во влажный сезон (оба зенитных положения солнца в году приходятся на влажный сезон, что в тропиках выполняется не всегда) в сочетании с характерной для Южного Вьетнама ослабленной облачностью в дневное время. Полностью пасмурные дни в среднем за влажный сезон составляли только десятую часть всех дней, а преобладала переменная облачность.

¹ Средней продолжительности сухого сезона за 1980-2010 гг. по критериям (Дещеревская и др., 2013).

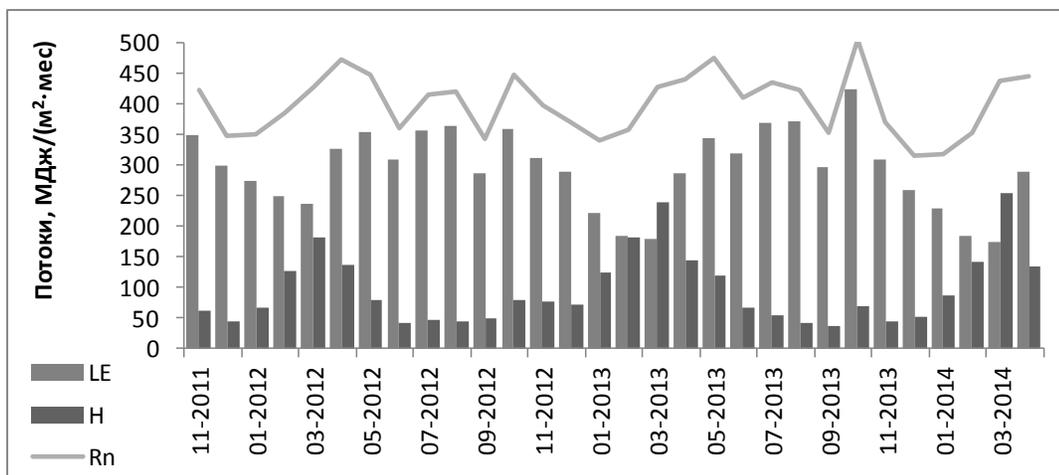


Рисунок 2 – Радиационный баланс (R_n), затраты тепла на суммарное испарение (LE), турбулентный поток тепла в атмосферу (H) за период 11/2011-05/2014

Муссонный климат Южного Вьетнама в отличие от более континентального климата центральной Амазонии обеспечивает тропическим лесам Южного Вьетнама высокие суммы солнечной радиации и за год, и во влажный сезон. Отчасти также высокий радиационный баланс связан с низким альбедо леса Кат Тьен (от 10,5 до 12,0 %), что соответствует нижней границе отражательной способности тропических лесов.

Таким образом, лес Кат Тьена получает значительные энергетические ресурсы для поддержания потоков тепла, влаги и CO_2 . Высокий радиационный баланс во влажный сезон создает благоприятные условия для фотосинтетической и транспирационной активности – большое количество света при обилии влаги.

Глава 4. Суточная и сезонная динамика потоков тепла, влаги и углекислого газа

4.1. Тепловой баланс. Наиболее ёмкими расходными компонентами теплового баланса, на которые суммарно тратилось 96 ÷ 98 % месячных сумм радиационного баланса, были затраты тепла на испарение (скрытый теплообмен, LE) и затраты тепла на турбулентный нагрев атмосферы (явный теплообмен, H). На создание валовой первичной продукции во влажный сезон тратилось до 4 % радиационной энергии (как и в постоянно-влажных тропических лесах), а в самое

сухое время года – 2 %. В сезонном ходе поток тепла в почву, изменения запаса тепла в воздухе и почве оказывались несущественными по сравнению со скрытым теплом, явным теплом и затратами энергии на фотосинтез.

Так как стандартными приборами сети FLUXNET измеряются все компоненты теплового баланса, значимые в сезонном ходе, можно посчитать невязку теплового баланса. В Кат Тьене невязка за 2012 г. составила 16,3 %, за 2013 г. – 18,9 %, что немного меньше среднего по сети FLUXNET значения 20 %. По методике (Foken et al., 2008; Eddy..., 2012) для дальнейшего анализа невязка была распределена между турбулентными потоками явного и скрытого тепла согласно отношению Боуэна H/LE .

В два самых сухих месяца суммарное испарение снижалось вдвое относительно двух самых влажных месяцев (Рисунок 2). Лес поддерживал испарение на уровне $70 \div 90$ мм/мес даже в те месяцы сухого сезона, когда сумма осадков составляла $0,2 \div 4,0$ мм/мес. Наличие влаги в грунте и сохранение листьев у вечнозеленых деревьев нижних подъярусов обеспечивает относительную стабильность потока испарения. Во влажный сезон, когда сумма осадков составляла $300 \div 600$ мм/мес, испарение оставалось на уровне всего $120 \div 140$ мм/мес.

Турбулентный поток тепла в атмосферу увеличивался в 3,5 раза в самое жаркое и сухое время года по сравнению с влажным сезоном (Рисунок 2). На 1-2 самых засушливых месяца турбулентный поток тепла в атмосферу достигал $\frac{1}{2}$ от радиационного баланса, в остальные месяцы года составлял не более 20 %. Во второй половине сухого сезона доля радиационного баланса, затрачиваемая на испарение, снижалась, а на турбулентный нагрев атмосферы – увеличивалась.

4.2. Вертикальные потоки влаги. Годовая сумма осадков в Кат Тьене (за 2012 г. 2621 мм, за 2013 г. – 2634 мм) была выше, чем на 18 станциях из рассмотренных 22 станций в других тропических лесах; в частности, в Кат Тьене выпадало больше осадков, чем на большей части станций Амазонии.

Средняя годовая интенсивность испарения (E) в Кат Тьене (за 2012 г. 1548 мм, за 2013 г. – 1476 мм) немного превысила мультимодельную оценку в

целом для территории Амазонии (Fisher et al., 2009), хотя влажные тропические леса в срединной части Амазонии обладают более высоким E . Только три станции FLUXNET в тропических лесах из 22, по которым имеются данные об испарении, обладали более высоким E , чем лес Кат Тьена.

Корреляция суммарного испарения с радиационным балансом в течение всего года была выше 0,5. Эффект недостатка влаги начинал сказываться только в два самых засушливых месяца; об этом свидетельствовала понижавшаяся корреляция Rn с E . Во влажный сезон испарение увеличивалось при повышении дефицита водяного пара. В самые сухие месяцы суммарное испарение экосистемы (4/5 которого составляла транспирация) не увеличивалось в дневные часы с увеличением дефицита водяного пара (Рисунок 3, а), причиной чего в большой степени была устьичная лимитация.

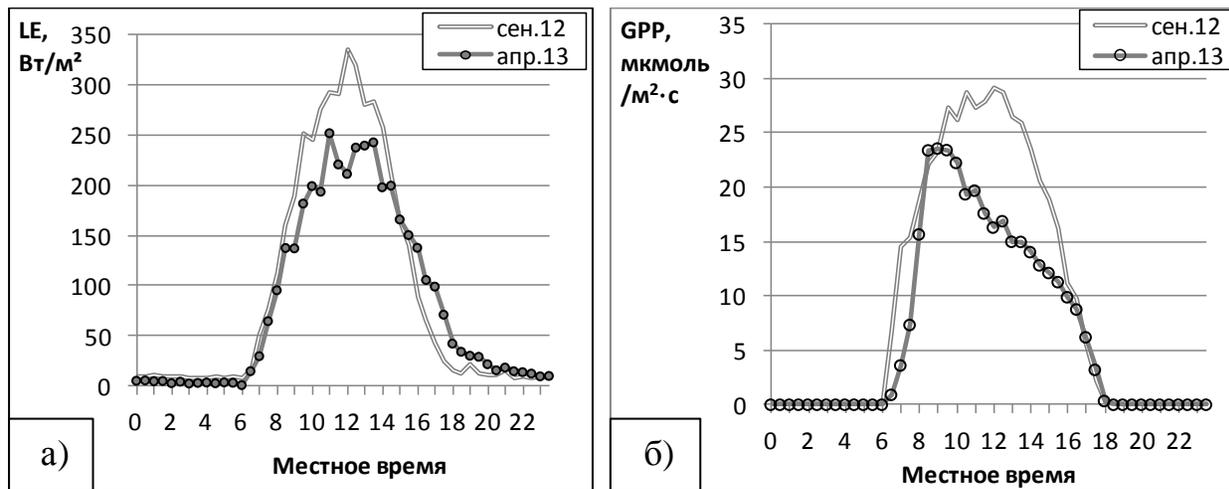


Рисунок 3 – Суточный ход суммарного испарения (LE) (а) и валовой первичной продукции экосистемы (GPP) (б) в характерные периоды года – пик влажного сезона (сентябрь 2012 г.) и пик сухого сезона (апрель 2013 г.)

Сравнительно высокое годовое суммарное испарение в Кат Тьене было обусловлено тремя факторами: высокой годовой суммой осадков, большой суммой радиационного баланса за год и во влажный сезон, а также возможностью сохранения интенсивного испарения в сухой сезон благодаря доступу корней деревьев к влаге в грунте. В функционировании муссонных лесов со сложной

структурой древостоя, по-видимому, исключительную роль играют гидрогеологические особенности грунтов. Грунты в Кат Тьене, накапливая воду с влажного сезона, служат буфером для влагообмена экосистемы.

4.3. Потоки и баланс углекислого газа. Были рассмотрены следующие потоки углекислого газа: валовая первичная продукция (результат фотосинтеза), дыхание экосистемы (результат процессов деструкции) и нетто-обмен углерода экосистемы (разность дыхания и валовой первичной продукции).

Валовая первичная продукция (*GPP*) в два самых сухих месяца снижалась на 30 ÷ 44 % относительно двух самых влажных месяцев (Рисунок 4). Несмотря на значительное снижение, абсолютные величины валовой первичной продукции в сухой сезон оставались достаточно высокими за счет фотосинтезирующих деревьев 2-4 подъярусов. Дыхание экосистемы (*Reco*) в два самых сухих месяца снижалось на 33 ÷ 35 % относительно двух самых влажных месяцев. Во влажный сезон *Reco* сохранялось на уровне постоянно-влажных тропических лесов.

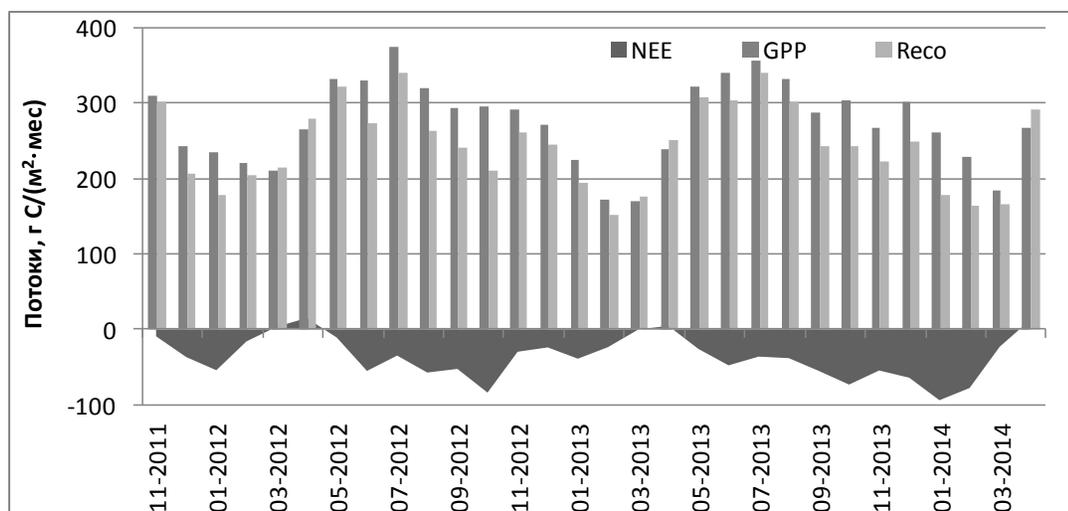


Рисунок 4 – Сезонный ход валовой первичной продукции (*GPP*), дыхания экосистемы (*Reco*) и нетто-обмена углерода экосистемы (*NEE*, отрицательные значения означают сток углерода из атмосферы в экосистему)

В пике влажного сезона ограничением валовой первичной продукции выступало количество полученной фотосинтетически активной радиации, а также

низкий дефицит водяного пара и относительно невысокая температура. В сухой сезон *GPP* достигала максимума утром, а затем в течение дня с увеличением дефицита водяного пара снижалась (Рисунок 3, б). Выраженным ограничением процессов продукции и деструкции служила доступность влаги. Нехватка влаги в почве, недостаток влаги для транспирации при усиленном запросе на охлаждение листьев в условиях высокой температуры и интенсивного солнечного света приводили к сильной устьичной регуляции фотосинтеза. Устьичная лимитация снижала *GPP* к полудню до 70 % от утренних значений, а еще через 2-3 часа – до 50 % (Рисунок 4). В сухой сезон влажность почвы больше влияла на *Reco*, чем температура, хотя известна общая закономерность экспоненциального увеличения *Reco* с ростом температуры (Lloyd, Taylor, 1994). Низкая температура в начале сухого сезона немного ослабляла зависимость процессов углеродного цикла от влаги. Наблюдавшееся в начале сухого сезона повышение *Reco*, возможно, было связано с высыханием луж и ручьев и разложением находящейся в них органики.

Как фотосинтез, так и дыхание лимитировались нарастающим дефицитом влаги в почве во второй половине сухого сезона, однако фотосинтез лимитировался больше, поэтому нетто-обмен углерода приближался к нулю в самое засушливое время. Фотосинтез также ограничивался снижением листового индекса² (площадью листьев на единицу площади поверхности) в сезонном ходе.

В связи со сложностью алгоритмов заполнения пропусков для расчета годовой суммы нетто-обмена углерода было предложено использовать три варианта оценок: «стандартную» оценку (стандартный алгоритм FLUXNET), «устойчивую» оценку (алгоритм, устойчивый к большой доле ночных пропусков), а также диапазон значений, полученных с помощью разных методов заполнения пропусков. Так, в Кат Тьене «стандартная оценка» *NEE* для 2012 г. равна (-401±20) грамм углерода на метр квадратный в год, для 2013 г. (-453±14) г C/(м²·год) (отрицательное значение означает сток). Наиболее устойчивым к большой доле

² Динамика листового индекса может быть выражена через долю деревьев, сбрасывающих листья, и длительность безлистной фазы; эти характеристики зависят как от видовой структуры тропического леса (в свою очередь, связанной с нарушенностью), так и от многолетнего режима осадков территории.

пропусков является алгоритм заполнения ночных значений средними по сезонам значениями в наиболее благоприятных для пульсационного метода условиях (по Kosugi et al., 2012). Тогда *NEE* в Кат Тьене составит $-359 \text{ г С}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ за 2012 г. и $-381 \text{ г С}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ за 2013 год. Диапазон годовых значений, полученных различными методами заполнения пропусков, для 2012 г. составил от -296 до $-581 \text{ г С}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ (80 % полученных значений от -340 до $-530 \text{ г С}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$).

Как видно из приведенных данных, при широком разбросе значений не вызывает сомнений факт наличия в Кат Тьене в 2012 и 2013 гг. большого отрицательного нетто-обмена углерода, около $(-400 \div 450 \pm 100) \text{ г С}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ (экспертная оценка точности) – т.е. лес в целом поглощал углерод из атмосферы. Тем не менее, неопределенность размера стока велика, и особенно она зависит от оценок ночного дыхания экосистемы.

В целом, в Кат Тьене сток углерода больше средних величин для тропических лесов (Phillips et al., 1998; Malhi, Grace, 2000; Ciais et al., 2008; Lewis et al., 2009), но не является исключительным (Malhi et al., 2009; Tan et al., 2010; Rowland et al., 2014). От четверти до трети стока, скорее всего, обусловлено вымыванием углерода с речным стоком и эмиссией в виде углеродных соединений, не улавливаемых пульсационным методом (Guenther, 1997; Malhi and Grace, 2002; Saito et al., 2008; Raymond et al., 2013). Однако основная часть углерода в Кат Тьене, по-видимому, поступает в почву и биомассу. Пульсационные измерения, учеты биомассы и оценки количества углерода в почве в тропических лесах мира (более 400 точек в Амазонии, Юго-Восточной Азии и в Африке) за 1980-2000-е гг. показывают, что первичные леса накапливали в биомассе и почве, по средним оценкам из разных работ, от $73 \div 118$ до $360 \text{ г С}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ (обзор Grace et al., 2014).

По гипотезе Одума, климаксная экосистема в неизменных условиях среды имеет нулевой баланс по углероду с окружающей средой (Одум, 1986). Наиболее вероятной причиной большого отрицательного нетто-обмена углерода между лесом и атмосферой (стока углерода из атмосферы в лес) является нарушение стационарного функционирования леса. Это может быть либо биологическая

нестационарность (восстановление после нарушений, в т.ч. выборочных рубок в XX в.), либо специфический сильный отклик экосистемы на изменение климата (повышение осадков в сухой сезон и температуры во все месяцы, кроме самых жарких), либо специфический сильный отклик на изменение газового состава атмосферы (увеличение количества CO_2). Сильный отклик экосистемы на улучшение условий среды возможен, так как, по-видимому, отсутствует типичная для тропических лесов лимитация по питательным элементам: почвы Кат Тьена – вулканические, молодые и богатые азотом и фосфором по сравнению с древними латеритными почвами, преобладающими на равнинах влажных тропиков.

Значительная (в сравнении с постоянно-влажными тропическими лесами) абсолютная величина валовой первичной продукции муссонного тропического леса (за 2012 г. около 3436 г С/м^2 , за 2013 г. около 3431 г С/м^2) была обусловлена сочетанием трех факторов: а) довольно высоким листовым индексом и наличием вечнозеленых нижних подъярусов леса, фотосинтезирующих в сухой сезон; б) значительным радиационным балансом в течение года и во влажный сезон; в) большой годовой суммой осадков и возможностью сохранения высокой транспирации леса в сухой сезон. Дыхание экосистемы (за 2012 г. около 3035 г С/м^2 , за 2013 г. около 2988 г С/м^2) оказалось на нижней границе значений, характерных для тропических лесов, так как в сухой сезон вследствие снижения влажности почвы дыхание сокращалось в 1,5 раза относительно влажного сезона.

Глава 5. Взаимосвязь потоков радиации, тепла, влаги и углекислого газа

5.1. Эффективность использования ресурсов в экосистеме. Радиационный баланс составлял почти 90 % поступающей солнечной радиации. Затраты тепла на испарение составляли в радиационном балансе около $\frac{3}{4}$, что характерно для постоянно-влажных тропических лесов. Доля затрат на фотосинтез в радиационном балансе в Кат Тьене была на нижней границе величин в первичных тропических лесах Юго-Восточной Азии и Амазонии. Эффективность использования воды для создания продукции в тропическом муссонном лесу Кат Тьена лежит в диапазоне значений, характерных для тропических сезонных и постоянно-влажных лесов.

5.2. Проводимость поверхности. Проводимость поверхности в Кат Тъене (условная величина, обратная сопротивлению экосистемы для потока испаряемой воды, зависящая преимущественно от устьичной проводимости) во влажный сезон превышала известные оценки для тропических лесов и приближалась к проводимости агроэкосистем. В пик сухого сезона же проводимость была очень низкой, сравнимой с саваннами при средней влагообеспеченности. Низкая проводимость ограничивала транспирацию и еще больше – продукцию (Рисунок 3). Тем не менее, даже в пик сухого сезона месячные суммы испарения и валовой первичной продукции оставались сравнительно высокими.

5.3. Лимитирующие факторы энерго- и массообмена и взаимосвязь потоков тепла, влаги и углекислого газа. Раздел 5.3 представляет собой обобщение всей диссертационной работы через анализ лимитирующих факторов энерго- и массообмена (ЭМО) и характеристик экосистемы, влияющих на ЭМО.

Сравнение годовых величин ЭМО в Кат Тъене с другими тропическими лесами мира свидетельствует, что исследуемый тропический муссонный лес по интегральным показателям ЭМО приближается к тропическим вечнозеленым лесам. Ключевыми условиями среды, формирующими годовые величины тепло- и влагообмена леса в Кат Тъене, являлись годовое количество и синхронность сезонного хода ресурсов энергии и влаги. Сезонная динамика ЭМО зависит в первую очередь от длительности сухого сезона, количества и частоты осадков; однако снижение потоков *GPP* и *LE* в сухой сезон было в целом небольшим. В Кат Тъене сухой сезон относительно недолог (в среднем 4 месяца с суммой осадков в каждом месяце <100 мм) и смягчается периодическим проникновением воздуха с Тихого океана, однако засушливость и длительность сухого сезона значительно возрастает, когда наблюдается теплая фаза метеорологического явления Эль-Ниньо-Южное Колебание.

Ключевыми характеристиками экосистемы муссонного тропического леса для энерго- и массообмена являлись 1) характеристики листопадности (процент деревьев, сбрасывающих листья, длительность безлистной фазы), выражающиеся

через сезонную динамику листового индекса; 2) наличие грунтовых вод либо способность грунтов к накоплению влаги на сухой сезон. Сезонные изменения листового покрова тропического леса зависят от видового состава; прослеживаются связи фенологии с нарушенностью леса. В муссонном климате экосистема зрелого леса «стремится сгладить» сезонные изменения количества осадков, сохраняя по возможности высокое суммарное испарение и фотосинтез в сухой сезон.

Годовая величина нетто-обмена углерода из всех рассмотренных величин наименее связана с метеорологическими параметрами и наиболее связана с историей развития экосистемы и ее потенциалом «углеродного ответа» на меняющиеся климатические условия, что сходно с результатами (Luysaert et al., 2008). Так, в тропиках большую роль для абсолютных величин *NEE* может играть обеспеченность почв минеральными элементами. Причины функционирования экосистемы как источника или стока углерода следует искать не в метеорологических условиях как таковых, на чем ранее базировались большинство работ (Yi et al., 2010), а в сравнении имеющегося и потенциального (как в эталонных лесах) запаса углерода экосистемы в данных климатических и эдафических условиях. Тогда на первый план для анализа равновесности по углероду экосистемы и атмосферы выходят такие характеристики экосистемы, как биомасса, нарушенность, доступность элементов питания, а также такие характеристики среды, как изменения климата и химического состава атмосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено, что обеспеченность энергией (радиационный баланс) муссонной лесной экосистемы юга Вьетнама превышает обеспеченность энергией большинства тропических лесов по данным сети эколого-климатического мониторинга FLUXNET. Высокие годовые суммы радиационного баланса в тропиках обусловлены сдвигом максимума облачности с дневного на вечернее время, связанным с влиянием океана.

2. Найдено, что сезонный ход структуры теплового баланса муссонного тропического леса обусловлен сезонной динамикой атмосферного увлажнения с

учетом запаздывания при переходе к сухому сезону. Суммарное испарение в течение всего года определялось радиационным балансом, за исключением 1-2 самых сухих месяцев. В засушливых условиях примерно половина приходящей энергии тратилась на турбулентный нагрев атмосферы.

3. Показано, что сохранялось высокое (на уровне $70 \div 90$ мм в месяц) суммарное испарение экосистемы при выпадении очень малого количества осадков в течение нескольких месяцев (на уровне $0,2 \div 4,0$ мм в месяц).

4. Выявлено, что муссонный тропический лес юга Вьетнама характеризуется большими годовыми суммами эвапотранспирации (суммарного испарения) и валовой первичной продукции, на уровне постоянно-влажных тропических лесов Амазонии и Юго-Восточной Азии, несмотря на наличие продолжительного (4 месяца) сухого сезона.

5. Впервые показано, что муссонный тропический лес Юго-Восточной Азии может быть значительным устойчивым стоком углерода из атмосферы (в 2012-2013 гг. сток составлял около $(400 \div 450 \pm 100)$ грамм С на квадратный метр в год).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи:

1. Дешеревская (Куричева) О.А., Авилов В.К., Динь Ба Зуй, Чан Конг Хуан, Курбатова Ю.А. Современный климат национального парка Кат Тьен (Южный Вьетнам): использование климатических данных для экологических исследований. Геофизические процессы и биосфера, т. 12, № 2, 2013. С. 5–33.

2. Куричева О.А., Авилов В.К., Динь Ба Зуй, Курбатова Ю.А. Водный цикл экосистемы сезонно-влажного тропического леса (Южный Вьетнам). М.: Геофизические процессы и биосфера, т. 13, №3, 2014. Стр. 55-82.

3. Kurbatova Ju.A., **Deshcherevskaya (Kuricheva) O.A.**, Avilov V.K., Novichonok A.O., Ba Duy Dinh, Kuznetsov A.N. Establishment of eddy-flux site in Vietnam: first results. AsiaFlux Newsletter, N. 36, Nov. 2013.

4. Tran Cong Huan, Dinh Ba Duy, Kurbatova Ju.A., **Desherevskaya (Kuricheva) O.A.**, Avilov V. Co so ly thuyet cua phuong phap phuong sai rong nghien cuu dong nhiet, am, CO2 va cac dac trung khi thuat cua tram cuan trac dong Nam Cat Tien. Khoa hoc va cong nghe viet doi (Journal of tropical science and technology), 12-2012 (на вьетнамском).

Тезисы:

1. **Дещеревская (Куричева) О.А.** Потоки влаги в тропическом муссонном лесу Южного Вьетнама в сухой сезон. В изд.: Актуальные проблемы экологии и эволюции в исследованиях молодых ученых. Тезисы конференции молодых сотрудников и аспирантов ИПЭЭ РАН. М.: Т-во научных изданий КМК, 2012.

2. **Куричева О.А.** Сокращение потоков CO₂ и влаги в муссонном тропическом лесу Южного Вьетнама в сухой сезон. В изд.: Актуальные проблемы экологии и эволюции в исследованиях молодых ученых. Материалы шестой конференции молодых сотрудников и аспирантов ИПЭЭ РАН. Москва: Т-во научных изданий КМК. 2014. Стр. 113-114.

3. Курбатова Ю.А., Авилов В.К., **Дещеревская (Куричева) О.А.**, Ольчев А.В. Энерго- и массообмен тропического леса: эксперимент и моделирование. Математическое моделирование в экологии / Материалы Третьей Национальной научной конференции с международным участием, 21-25 октября 2013 г. – Пущино, ИФХиБПИ РАН, 2013

4. **Deshcherevskaya (Kuricheva) O.**, Avilov V., Dinh Ba Duy, Novichonok A., Tran Cong Huan and Kurbatova J. Heat, water and carbon dioxide fluxes at the first Vietnamese eddy covariance site in tropical seasonal forest. Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2013, Vienna, Vol. 15, EGU2013-10397-6, 2013.

5. **Deshcherevskaya (Kuricheva) O.**, Anichkin A., Avilov V., Dinh Ba Duy, Do Phong Luu, Tran Cong Huan, Kurbatova J. Strong carbon sink of monsoon tropical forest in Southern Vietnam. Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2014, Vienna, Austria, Vol. 16, EGU2014-11039, 2014.

6. **Kuricheva O.**, Avilov V., Anichkin A., Dinh Ba Duy, Do Phong Luu, Nguyen Van Thinh, Novichonok A., Novichonok E., Kuznetsov A. and Kurbatova J. Heat and water exchange of seasonal tropical forest of Southern Vietnam. //AsiaFlux Workshop-2014 proceedings “Bridging Atmospheric Flux Monitoring to National and International Climate Change Initiatives”, [P2-3], p. 53.

7. Avilov V., Anichkin A., **Descherevskaya (Kuricheva) O.**, Evdokimova E., Thinh Nguyen Van, Novichonok A., Luu Do Phong, Kurbatova J., and Lopes de Gerenyu V. Soil respiration in tropical seasonal forest of Southern Vietnam. Vol. 15, EGU2013-9463-8, 2013.

8. Kurbatova J., Ba Duy Dinh, Avilov V., **Deshcherevskaya (Kuricheva) O.**, Novichonok A., Phong Luu Do, Cong Huan Tran, Kuznetsov A. Energy and CO₂ fluxes at the first Vietnamese eddy covariance site in tropical seasonal forest. //Asiaflux workshop-2013 proceedings “Communicating science to society: Coping with climate extremes for resilient Ecological-Societal Systems”, [A7-084], p.84.

9. Avilov V., **Kuricheva O.**, Dinh Ba Duy, Do Phong Luu, Nguyen Van Thinh, Kuznetsov A., Kurbatova J. Soil and ecosystem CO₂ fluxes in seasonal tropical forest of Southern Vietnam//AsiaFlux Workshop-2014 proceedings “Bridging Atmospheric Flux Monitoring to National and International Climate Change Initiatives”, [2-4], p.17.