

На правах рукописи

Куричева Ольга Алексеевна

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

03.02.08 – экология
(биологические науки)

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата биологических наук

Научный руководитель:
кандидат биологических наук,
доцент Ю.А. Курбатова

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГО- И МАССООБМЕНА ТРОПИЧЕСКИХ ЛЕСОВ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА	9
1.1. ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРОПИЧЕСКИХ ЛЕСОВ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ	9
1.2. ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГО- И МАССООБМЕНА ТРОПИЧЕСКИХ ЛЕСОВ	13
1.3. ТЕКУЩИЕ И ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В ТРОПИКАХ.....	20
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТ И МЕТОД.....	23
2.1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ - МУССОННЫЙ ТРОПИЧЕСКИЙ ЛЕС НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА КАТ ТЬЕН.....	23
2.2. МЕТОД ПУЛЬСАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	33
ГЛАВА 3. ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ: ПОГОДНЫЕ УСЛОВИЯ И РАДИАЦИОННЫЙ БАЛАНС	60
3.1. ПОГОДНЫЕ УСЛОВИЯ	60
3.2. РАДИАЦИОННЫЙ БАЛАНС	77
ГЛАВА 4. СУТОЧНАЯ И СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ПОТОКОВ ТЕПЛА, ВЛАГИ И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА.....	95
4.1. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС.....	95
4.2. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОТОКИ ВЛАГИ	112
4.3. ПОТОКИ И БАЛАНС УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА	140
ГЛАВА 5. ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОТОКОВ РАДИАЦИИ, ТЕПЛА, ВЛАГИ И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА.....	181
5.1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ В ЭКОСИСТЕМЕ	184
5.2. ПРОВОДИМОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ.....	189
5.3. ЛИМИТИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ ЭНЕРГО- И МАССООБМЕНА И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЬ.....	200
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	210
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	215
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. КАРТЫ КАТ ТЬЕНА С РАСПОЛОЖЕНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ (РИСУНКИ 1-6).	248
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ТАКСОНОМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ СЕКТОРА НАМ КАТ ТЬЕН И ПРОФИЛЬНЫЕ ДИАГРАММЫ ЛЕСНОГО ДРЕВОСТОЯ (КУЗНЕЦОВ, КУЗНЕЦОВА, 2011).....	251

Введение

Актуальность 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, которые 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 (Clark и Clark, 2011; IPCC, 2013).

Лесные экосистемы благодаря высокой биомассе и продуктивности играют решающую роль в обмене углекислого газа между наземными биомами и атмосферой (Malhi et al., 1999; Falge et al., 2002; Руднев, 2003; Clark, 2004; Granados, 2006; Luyssaert 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 экосистемы получают и перерабатывают наибольшее количество солнечной радиации, тепла и влаги среди всех наземных экосистем. К 2000 г. около половины первичных тропических лесов Земли сведено и преобразовано во вторичные обедненные сообщества (Sommer, 1976; International..., 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 страны, в 1940-х гг. – 45 % (Maurand, 1943; Руднев, 2003); после того, как в начале

1990-х гг. эта величина снизилась уже 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 Hop 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 и Adams, 2001; Кузнецов, 2003; Кузнецов и Кузнецова, 2011). Сохранившиеся массивы первичных лесов остро нуждаются в охране, т.к. тропический лес со сложной структурой не возобновляется естественным путем на месте саванноподобных сообществ, возникших на обширных площадях в результате сведения муссонных лесов (Кузнецов и Кузнецова, 2013). Изучение функционирования муссонных тропических лесов должно стать шагом на пути к созданию технологий по управлению лесными ресурсами в Юго-Восточной Азии.

Функционирование сезонно-влажных тропических лесов Юго-Восточной Азии сравнительно мало изучено по сравнению с постоянно-влажными тропическими лесами (Seasonally..., 2011; Структура и функции..., 2011). Между тем, метаболизм муссонных лесов значительно отличается от метаболизма 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 в Юго-Восточной Азии, а также существенное влияние тропических муссонных лесов на климат обосновывает актуальность данной работы.

Цель диссертационной работы состояла в выявлении специфики энерго- и газообмена (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 метеорологических условиях;
3. Выявление особенностей энерго- и массообмена 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.

Информационная база работы включает 1) данные о вертикальных потоках солнечной радиации, тепла, влаги и углекислого газа, а также метеорологические измерения над лесом, в пологе леса и в почве на станции пульсационных наблюдений в Южном Вьетнаме и 2) доступные для анализа данные о потоках солнечной радиации, тепла, влаги и углекислого газа мировой сети наблюдений FLUXNET.

Научная новизна работы. Для муссонного тропического леса Южного Вьетнама впервые получены данные о суточной и годовой изменчивости потоков тепла, влаги и углекислого газа. Впервые показано, что энерго- и массообмен (валовая первичная продукция и суммарное испарение) сезонно-влажного тропического леса может достигать аналогичных величин для постоянно-влажных лесов Амазонии, несмотря на наличие продолжительного сухого сезона, при условии обилия ресурсов тепла и влаги в годовом цикле и доступности влаги для корней в сухой сезон. Впервые показано, что муссонный тропический лес может быть значительным устойчивым стоком углерода для атмосферы.

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, что особенно важно в контексте глобальных изменений климата. Показано, что в классификации тропических лесов необходимо учитывать функциональный аспект, в частности, годовые суммы энерго- и массообмена, а не только климатические параметры. Указание на важность учета гидрогеологических характеристик ландшафта в формировании и функционировании сезонно-влажного тропического леса может быть применено для лесоразведения в муссонном тропическом климате. Инструментальные результаты могут быть использованы для уточнения параметров моделей энерго- и массообмена тропических экосистем и 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, за исключением 1-2 самых сухих месяцев года. В сухой сезон испарение снижается на 20% 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).

Апробация работы и публикации. Основные положения и выводы диссертации были представлены на международных Симпозиумах Европейского геофизического сообщества (Австрия, Вена, 2012-2014); на научном семинаре Института Прикладной механики и информатики Вьетнамской Академии Наук и технологий, посвященном Инициативному проекту Asia Geo Grid и развитию мониторинга за потоками парниковых газов на территории Вьетнама (Вьетнам, Хошимин, 2013); на совместном семинаре Института Тропической Биологии Вьетнамской Академии Наук и Технологий и Центра по исследованию Глобальных изменений Чешской Академии Наук «Обзор состояния пульсационных измерений во Вьетнаме, включая новые данные со станции в национальном парке Кат Тьен. Фиксация и баланс углерода и влияние глобальных изменений» (Вьетнам, Хошимин, 2012); на семинарах Совместного Российско-Вьетнамского научно-исследовательского и технологического тропического центра (Вьетнам, Хошимин, 2012, 2013); 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, Пушкино, 2013).

По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 4 статьи, 2 из которых – в журналах из перечня ВАК РФ.

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

В первой главе раскрывается актуальность выбранной темы и описывается современное состояние исследований по теме диссертации. Во второй главе дается характеристика объекта и метода исследования. Третья глава включает

определение обеспеченности исследуемой экосистемы климатическими ресурсами. В четвертой главе анализируется сезонная и суточная динамика потоков тепла, влаги и углекислого газа в муссонном тропическом лесу. В пятой главе исследуется взаимосвязь потоков и характеризуется структура энерго- и массообмена муссонного тропического леса в различные периоды года.

Благодарности:

Администрации и сотрудникам Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического Центра за возможность работать во Вьетнаме и создание условий работы на высоком уровне. Администрации Национального парка Кат Тьен за возможность работать на территории, помощь с решением организационных проблем. Научному руководителю Ю.А. Курбатовой за старт вьетнамского проекта по пульсационным измерениям, оперативное решение организационных проблем, всестороннюю поддержку и обсуждения. Коллективу Географического факультета МГУ им. Ломоносова и, в частности, коллективу кафедры метеорологии и климатологии за сформированное системное физико-географическое мышление и навыки работы в полевых условиях. А. Дещеревскому за уникальную программу обработки геофизических данных ABD и обсуждение статистических методов; 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; Э. Галояну за предоставленные метеорологические данные за 2011 год. Н. Куричеву за поддержку, обсуждения и замечания.

Исследования были поддержаны РФФИ, грант 14-04-31973 мол_а «Связь потоков влаги с потоками тепла и CO_2 в тропическом сезонно-влажном лесу Южного Вьетнама» (2014-2015 гг.).

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

В главе приводится краткий очерк истории и современного состояния тропических лесов Юго-Восточной Азии. Дается представление об изучении энерго- и массообмена тропических лесов с обзором литературы по существующим измерениям энерго- и массообмена. Характеризуются современные климатические изменения в Юго-Восточной Азии.

1.1. История и современное состояние тропических лесов Юго-Восточной Азии

Модельная климатическая оценка площади тропических лесов на земном шаре при отсутствии деятельности человека для современного климата (1961-1990 гг.) составляет 1600 млн га (Sommer, 1976). По оценкам Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, или ФАО, включающей в понятие «первичные леса» «леса, в которых отсутствуют следы деятельности человека», в 1990-2010 гг. осталось 1190...1102 млн га первичных тропических лесов (FAO, 2010). По более жестким стандартам Международной Организации по Тропической Древесине, которая включает в понятие «первичного леса» «леса, которые никогда не подвергались воздействию человека», за историю человечества было сведено 850 млн га тропических лесов, из которых 350 исчезли совсем, а 500 было преобразовано во вторичные сообщества (International..., 2002). Таким образом, уже сведено и нарушено более половины тропических лесов мира.

В Юго-Восточной Азии, по оценке Соммера (Sommer, 1976), когда-то было покрыто тропическими лесами 302 млн га территории. К 1976 г. осталось уже 187 млн га (62 %). К 1990 г., по оценкам ФАО, первичные леса занимали только 87 млн га. К 2010 г. первичные леса занимали около 81 млн га, или 27 % от первоначальной площади лесов в Юго-Восточной Азии.

Наиболее велики были темпы деградации тропических лесов в 1980-х – 1990-х годах. Так, в 1950-1979 гг. тропическое обезлесение в мире достигало 10.5 млн га в год, в 1980-1995 14.7 млн. га в год, в 1996-2010 7 млн га в год (ФАО, 2012). Обезлесение в тропических развивающихся странах за период 1981-1985 составило 11.4 млн га в год (ФАО, 1988).

Но если в Южной Америке в 2000-2010 гг. обезлесение достигало 4.0 млн га в год, в Африке 3.4 млн га в год, то площади тропических лесов в Азии наконец начали восстанавливаться со скоростью 2.2 млн га в год за счет амбициозных программ лесовосстановления, по которым лидирует с большим отрывом Китай (ФАО, 2010). В Китае на лесные программы тратилось в 2005 г. 224.2 млн долл. США. Большая часть лесов насаждается на площадях, где раньше не было леса (afforestation). В целом по миру в 2000-2010 гг. площадь тропических лесов сокращалась на 5.2 млн га в год – т.е. за счет Азии темпы сведения тропических лесов относительно 1990-х снизились в 3 раза, но все же остались высокими. Насаждалось же в мире в целом 5 млн га леса в год.

Однако насаждаемые тропические леса качественно проще первичных по структуре и видовому составу. Восстановление тропических лесов, сходных с первичными – со сложной структурой и высоким биоразнообразием – не решенная по сей день научно-техническая задача. Неясно даже, удастся ли решить эту задачу в принципе – поэтому А.Н. Кузнецов назвал первичные муссонные тропические леса «невозобновляемым биологическим компонентом биосферы Земли» (Кузнецов, 2013). Шаги в направлении решения данной задачи должны сочетать исследование фундаментальных вопросов функционирования тропического леса с практическими разработками и долгосрочными экспериментами.

Большие программы по лесовосстановлению требуют изучения функционирования сохранившихся первичных лесов. В Камбодже, Лаосе, Вьетнаме первичные леса («не имеющие следов деятельности человека») в 2010 г. составляли лишь менее 10 % от всех лесов (FAO, 2010, табл. 7, стр. 251); в Малайзии, Таиланде – от 20 до 35 %.

Эволюция и современное состояние первичных тропических лесов Юго-Восточной Азии будут проиллюстрированы в настоящей работе на примере территории Вьетнама.

Тропические леса, подобные современным, появились в конце мелового периода, т.е. в конце мезозоя (65 млн лет назад). Появление тропических лесов связано с появлением экваториального климата, подобного современному: теплого и влажного. До этого массивы суши у экватора были протяженнее, муссоны слабее, и климат суши у экватора был жарким и сухим; в конце мезозоя раздвинулась Южная Атлантика, разделились Южная Америка и Африка. В мелу в целом произошла гумидизация, повышение влажности климата (Климат..., 2004). В кайнозое, к началу неогена (23-5 млн лет назад) тропические леса заняли область, близкую к их современному ареалу (Ziegler et al., 2003). В максимум последнего плейстоценового оледенения, 25000-15000 л.н., уровень моря был ниже на 120 м, в результате чего Индокитай, Калимантан и Ява представляли собой единый массив суши. В Южном Вьетнаме смыкались три биома: область саванн (западнее), муссонные леса (севернее), влажные тропические леса (юго-восточнее) (Ray, Adams, 2001). Следовательно, тропические леса Юго-Восточной Азии пережили последнее плейстоценовое оледенение, также как и леса Амазонии – значительно уменьшавшиеся в размерах, но не исчезавшие полностью. Между тем как леса Африки, например, в максимум последнего плейстоценового оледенения были практически полностью поглощены саваннами; полосы лесов оставались только в долинах рек. Поэтому тропические леса Африки значительно беднее видами, чем азиатские и южноамериканские. Климат мезозоя был значительно теплее кайнозойского (Информационные...,

1997), а оледенение 25000-15000 л.н. было одним из самых суровых в кайнозойском ледниковом цикле (Ray, Adams, 2001).

Высокое видовое разнообразие, сложная структура лесов, высокая специфичность древесных видов по отношению к эдафотопам (условиям питания) и мезозойские реликты ранга вида и семейства указывают на большой эволюционный возраст лесов Южного Вьетнама (Кузнецов и Кузнецова, 2013). Если учитывать наличие мезозойских реликтов, а также факт, что тропические леса Юго-Восточной Азии пережили одно из самых суровых оледенений за историю мезозоя-кайнозоя, можно сделать предположение, что эволюционная история тропических лесов Юго-Восточной Азии исчисляется миллионами лет.

Во времена, когда человек не оказывал существенного влияния на площадь лесов во Вьетнаме, лесами было, вероятно, покрыто около 80 % территории Вьетнама (Руднев, 2003), что соответствовало 26 млн га леса. К 1943 г. леса занимали уже 43 % территории (Maurand, 1943). 2.2 млн га вьетнамских лесов, из них 1.4 млн га на юге, было обработано гербицидами в 1962-1971 гг. (Кузнецов, 2003) до и во время американо-вьетнамской войны в 1965-1973 годах (датировки начала и конца военных действий немного различаются). В 1981-1990 гг. во Вьетнаме обезлесение составляло 1.5 % в год, в целом по Юго-Восточной Азии 1.6 %. Это вдвое выше, чем в целом по тропическим лесам мира в тот же период (0.8 %, или 15.4 млн га в год). В то же время шло увеличение площади древесных плантаций на 4.1 % в год, в целом в Юго-Восточной Азии на 5.9 % (FAO, 1993). В результате войн второй половины 20 века, промышленных рубок и расчистки лесов под нужды сельского хозяйства к 1992 году только 28 % площади Вьетнама, или 9.1 млн га, было занято лесами (Таблица 1).

Правительственные программы по сохранению лесов, начавшиеся в 1997 г., снизили количество лесозаготавливающих предприятий более чем в 2 раза (WWF..., 2001). Параллельно были приняты меры по посадкам деревьев. В 2005 г. Вьетнам вошел в тройку стран с самыми большими площадями лесовосстановления (0.139 млн га в год), после Китая (который идет с гигантским

отрывом, 4.85 млн га в год) и Индонезии (FAO, 2010). К 2010 г. доля лесов в общей площади страны восстановилась до 44 % (Таблица 1).

Таблица 1 – Площадь лесов (млн га) и доля лесов в общей площади Вьетнама, Юго-Восточной Азии и мира (FAO, 2010)

	1990	2000	2005	2010
Вьетнам, млн га	9.4 (28.8 %)	11.7 (35.9 %)	13.1 (40.2 %)	13.8 (44 %)
ЮВ Азия, млн га	325.4 (39 %)	301.1 (36 %)	299.3 (36 %)	294.4 (35 %)
Мир, млн га	4168.4 (32 %)	4085.2 (31 %)	4061.0 (31 %)	4033.1 (31 %)

Однако большая часть лесов – вторичны; 80-90 % лесов значительно нарушены. По оценкам Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, деятельностью человека в 2010 гг. был совсем не затронут только 1 % (!) лесов Вьетнама, что является следствием очень высокой плотности населения – 281 человек на км² (FAO, 2010). Поэтому столь важны изучение и охрана оставшихся слаборазрушенных первичных (никогда не вырубавшихся) лесов Юго-Восточной Азии.

1.2. Исследования энерго- и массообмена тропических лесов

Тропические леса осуществляют треть обмена CO₂ и создают около половины суммарного испарения суши, влияя на газовый состав атмосферы (Fisher et al., 2009; Malhi et al., 2012). Поэтому измерения энерго- и массообмена (ЭМО) тропических лесов представляют интерес для предсказания погоды и изменения климата. С другой стороны, характеристики энерго- и массообмена рассматриваются как интегральные показатели функционирования лесных сообществ и могут служить индикаторами их состояния.

Для определения характеристик ЭМО наземных экосистем с атмосферой в настоящее время широко используется метод пульсационных наблюдений (в англоязычной литературе – eddy covariance, eddy correlation). Теоретическая база метода была в основных чертах заложена в середине 20 века, а новое поколение высокочастотных газоанализаторов и анемометров (основные приборы метода) и программное обеспечение для них были разработаны к началу 1990-х. Тогда же появились первые станции мировой сети пульсационных наблюдений FLUXNET¹. Тестирование оборудования, приспособление его под различные природные условия, отладка систем энергоснабжения заняли еще несколько лет. Проект FLUXNET направлен на измерения ЭМО между земной поверхностью и атмосферой. Сеть быстро развивалась, и по состоянию на сентябрь 2013 г. насчитывала уже 560 точек (Рисунок 1). Тем не менее, станции в тропиках начали появляться только в конце 1990-х – начале 2000-х годов.

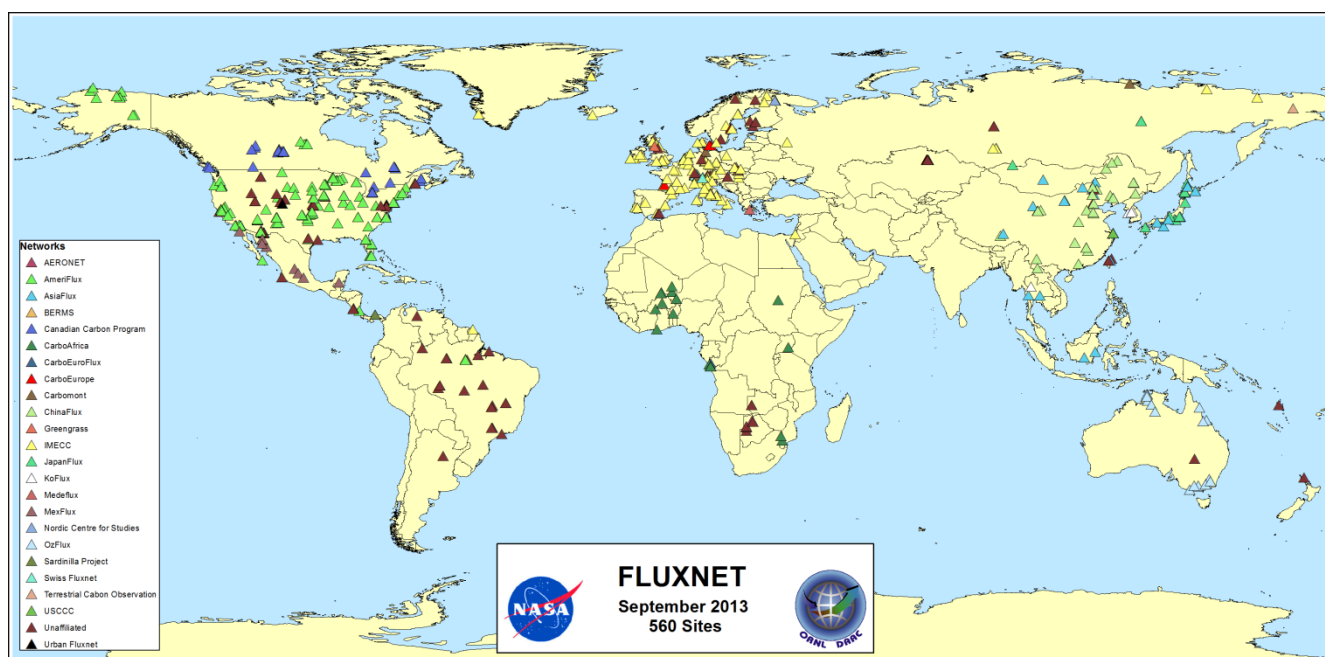


Рисунок 1 – Станции мировой сети пульсационных наблюдений FLUXNET по состоянию на сентябрь 2013 г.

(http://fluxnet.ornl.gov/sites/default/files/political_fluxnet_network_fullsize-9-13.png)

¹ [Http://fluxnet.ornl.gov/](http://fluxnet.ornl.gov/).

Всего станций FLUXNET (в т.ч. региональной азиатской сети ASIAFLUX) в тропических лесах насчитывается не менее 30. В Юго-Восточной Азии по состоянию на май 2014 г. зарегистрировано 19 станций пульсационных наблюдений (Рисунок 2, Таблица 2), в том числе: 5 равнинных лесов, 4 горных леса, 2 плантации масличной пальмы, плантации гевеи, тика, рисовый чек, посадки диптерокарпов, вторичный лес после пожаров, заболоченный лес, осушенный (бывший заболоченный) лес, точка с мультирастительностью.

К сожалению, станций в первичных тропических равнинных лесах Юго-Восточной Азии, кроме Кат Тьена, только 4: сезонные леса Сакаерат и Маеклонг в Таиланде, постоянно-влажные леса Пасо и Ламбир в Малайзии. Во всех этих лесах доминирует распространенное в Юго-Восточной Азии семейство диптерокарповые: роды диптерокарп, хопея и шорея.

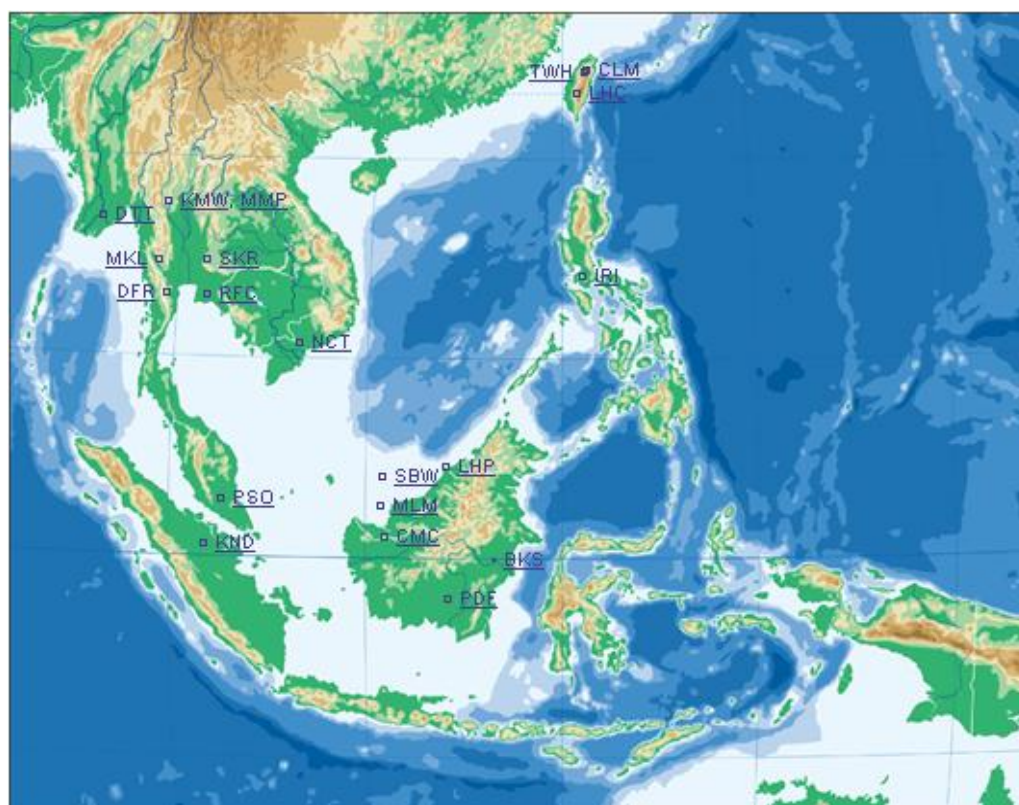


Рисунок 2 – Пульсационные станции в Юго-Восточной Азии, входящие в сеть ASIAFLUX, по состоянию на май 2014 г.

Таблица 2 – Информация* о станциях сети ASIAFLUX в тропиках по состоянию на май 2014 г.

Страна, станция	Код ASIA-FLUX**	Тип растительности	H, м	T, °C	Pr, мм год ⁻¹
<i>Вьетнам</i>					
Нам Кат Тьен (Nam Cat Tien)	NCT	Полулистопадный сезонный лес, доминанта - лагерстремия	140	26.4 (1981-2010)	2518
<i>Малайзия</i>					
Пасо (Pasoh)	PSO	Широколиственный вечнозеленый диптерокарповый лес	100	25.3 (2003-2009)	1865
Сибу (Sibu)	SBW	Посадки масличной пальмы	10	34.5	1913
Ламбир (Lambir Hills)	LHP	Смешанный диптерокарповый лес	200	27	2740
Малудам (Maludam)	MLM	Заболоченный лес, доминанта – шорея	10	27.0	4204
<i>Тайвань</i>					
Хуэйсунь (Taiwan Huisun)	TWH	Горный широколиственный лес	2000	11	2369
Чилань (Chi-Lan Mountain)	CLM	Старые хвойные посадки	1600	13	4000
Лиэньхуачих (Lien-Hua-Chih)	LHC	Широколиственный вечнозеленый лес	670	19.2 (1971-2000)	2404
<i>Таиланд</i>					
Маемо (Mae Moh plantation)	MMP	Плантация тика	380	25.6 (2001-2006)	1448 (2000-2007)
Сакаерат (Sakaerat)	SKR	Сезонный вечнозеленый лес, доминанта – хопея	540	24	1250
Чаченгсау (Rubber Flux Chachoengsao)	RFC	Плантация гевеи	70	28.0	1276
Когма (Kog-Ma)	KMW	Горный вечнозеленый лес	1350	19.9 (1998-2005)	1756
Так (Diverse land-cover site at Tak)	DTT	Разнообразная растительность	120	22	1100
Маеклонг (Mae Klong)	MKL	Сезонный вечнозеленый лес, доминанта – шорея	230	25 (1998-2012)	1500
Ратчабури (Ratchaburi)	DFR	Посадки молодых диптерокарпов	120	26.5 (2008-2009)	1125 (2009-2010)

Страна, станция	Код ASIA-FLUX**	Тип растительности	H, м	T, °C	Pr, мм год ⁻¹
<i>Индонезия</i>					
Букит Соехарто (Bukit Soeharto)	BKS	Вторичный макаранговый лес после пожаров Эль-Ниньо 1998 г. высотой 9-10 м	20	27 (1999-2004)	3300
Палангкарайа (Palangkaraya drained forest)	PDF	Вечнозеленый заболоченный лес после осушения	30	26.3 (2002-2005)	2231
Кандистасари (Kandistasari)	KND	Плантация масличной пальмы	70	26	2208
<i>Филиппины</i>					
Станция ИРПИ (IRRI Site)	IRI	Рисовый чек	20	27.5 (1979-2007)	2075

Примечания. *H – высота над уровнем моря, T – среднегодовая температура, Pr – годовая сумма осадков. В скобках указаны годы, за которые осреднены метеорологические переменные (при наличии данной информации);

**В сетях FLUXNET и ASIAFLUX приняты кодовые трехбуквенные обозначения станций. В таблице они приведены в соответствии с сайтом ASIAFLUX <http://asiaflux.net/>

В данной работе, наряду с анализом результатов первичных наблюдений, будет произведено сравнение параметров энерго- и массообмена в Кат Тьене с результатами других станций Юго-Восточной Азии, а также некоторых станций Амазонии и экваториальной Африки. За 1980-2010-е годы было написано несколько сотен статей по энерго- и массообмену тропических экосистем, измеренному пульсационным методом. Основная масса работ приходится на 2000-2010-е годы, когда по ряду пульсационных станций в Амазонии и Юго-Восточной Азии были накоплены ряды длиной в несколько лет. В это же время появились сравнительные работы по тепловому, водному, углеродному балансам различных типов растительности, основывающиеся на долгосрочных измерениях, и территориальные обобщения (Malhi, Grace, 2000; Law et al., 2002; Clark, 2004; Ciais et al., 2008; Saigusa et al., 2008; Tanaka et al., 2008; Fisher et al., 2009; da Rocha et al., 2009; Kosugi et al., 2012; Malhi, 2012).

Более подробно обсуждение характеристик ЭМО в Кат Тьене и на других станциях будут сделано в тематических главах, ниже дан только краткий обзор результатов пульсационных исследований в тропиках. В литературе приводятся следующие соотношения компонентов теплового, водного и углеродного баланса

для тропических лесов (практически все оценки относятся к влажным тропическим лесам):

1. Тепловой баланс, формирующийся на основе энергии радиационного баланса, включает затраты тепла на суммарное испарение (скрытое тепло), турбулентный теплообмен поверхности и атмосферы (явное тепло), поток тепла в почву, нагрев биомассы, затраты энергии на фотосинтез. Радиационный баланс тропических лесов, если осреднить 30-минутные круглогодичные измерения за год, составляет $160\text{--}230 \text{ Вт м}^{-2}$ (da Rocha et al., 2009), или $5050\text{--}7250 \text{ МДж м}^{-2}$ в год. По расчетам модели, связывающей испарение с солнечной радиацией (Fisher et al., 2008; Fisher et al., 2009), 72% радиационного баланса в Амазонии затрачивалось на испарение. Поток явного тепла, если осреднить 30-минутные круглогодичные измерения за год, составлял $20\text{--}38 \text{ Вт м}^{-2}$ (15% радиационного баланса).

2. Основными компонентами водного баланса являются осадки, суммарное испарение (эвапотранспирация) и сток. Общее количество радиации для тропических лесов Амазонии, выраженное в единицах слоя воды, которая могла бы испариться с затратой данной энергии, составляет $2230\text{--}3210 \text{ мм год}^{-1}$. Согласно расчетам (Fisher et al., 2009) по модели (Fisher et al., 2008) с использованием входных метеорологических данных архива ISLSCP-II, на станциях Амазонии со среднегодовым количеством осадков $1800\text{--}2200 \text{ мм}$ и продолжительностью сухого сезона 2-4 месяца испарение составляло в среднем 1370 мм в год (Fisher et al., 2009). В обзорной работе (da Rocha et al., 2009) сообщается об экспериментально измеренных колебаниях суммарного испарения в Амазонии в пределах $1130\text{--}1420 \text{ мм в год}$, максимальные дневные суммы отмечались в сухой сезон. В Юго-Восточной Азии (Tanaka et al., 2008) суммарное испарение колебалось от 0.6 (сухой сезон) до 5.9 мм день^{-1} (влажный сезон), причем на трех станциях отмечено увеличение эвапотранспирации во влажный сезон (с увеличением доступности влаги), а на одной – в сухой сезон (с увеличением количества доступной энергии). На некоторых станциях Амазонии (Vourlitis et al., 2008) испарение и транспирация в сухой сезон поддерживались на

высоком уровне за счет грунтовых вод; на станции Пасо (Малайзия) снижение доступности влаги вызывало снижение транспирации вследствие сужения устьиц (<http://www.bluemoon.kais.kyoto-u.ac.jp/pasoh>). В Амазонии (Fisher et al., 2008; Fisher et al., 2009) радиационный баланс объяснял 82 % дисперсии суммарного испарения, а благодаря сильной зависимости радиационного баланса от широты суммарное испарение снижалось с удалением от экватора. Главным лимитирующим фактором испарения после количества доступной энергии был дефицит водяного пара (14 %). Также испарение немного зависело от листового индекса (*NDVI*), рассчитанного при помощи спутниковых измерений, а также осадков и скорости ветра. Температура на испарение не оказывала существенного влияния. Модели испарения на основе температуры не давали хороших результатов. С осадками была обнаружена корреляция только на самой сухой станции и в сухой сезон. В итоге лучшие оценки *LE* давали модели на основе радиационного баланса и солнечной радиации.

В общем, испарение зависело от доступности воды (осадки, влажность почвы), структурных характеристик полога (листового индекса, *LAI*), и метеорологических условий (в первую очередь радиационного баланса и дефицита водяного пара).

3. Нетто-баланс углекислого газа экосистемы рассчитывается как разница валовой первичной продукции и суммарного дыхания экосистемы. Как продукция, так и дыхание тропического леса высоки в течение всего года (обе величины около $30\text{--}40 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ – по Malhi, 2012). Оценки нетто-баланса углерода лесов Амазонии, Африки и Юго-Восточной Азии имеют широкий спектр как на уровне континентов, так и по отдельным станциям (Phillips et al., 1998; Malhi, Grace, 2000; Miller et al., 2004; Ciais et al., 2008; Sajgusa et al., 2008; Lewis et al., 2009a; Malhi et al., 2009a; Tan et al., 2010; Rowland et al., 2014). Особенности получения различных оценок и возможные причины функционирования экосистемы в качестве стока или источника CO_2 будут обсуждаться в разделе 4.3. По данным (Sanches et al., 2008), в полулистопадном лесу Амазонии количество опада составляло $8\text{--}10.5 \text{ т га}^{-1} \text{ год}^{-1}$; дыхание почвы

составляло $28.8 \text{ т С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, дневные суммы почвенного дыхания были в 1.5 раза выше во влажный сезон, чем в сухой. Более 60% дисперсии продукции опада и дыхания почвы обусловлено ходом влажности почвы и осадков.

ЭМО зависит от фенологических ритмов, истории, нарушенности экосистем. Поэтому помимо статей, обобщающих результаты измерений энерго- и массообмена, в данной работе использовался класс работ, посвященных экологии и охране тропических лесов (Ричардс, 1961; Borchert, 1983; Murphy, Lugo, 1986; Dale, 2011; Miles et al., 2006; Seasonally..., 2011); прошлому, настоящему и будущему тропических лесов (Ray, Adams, 2001; Ziegler et al., 2003; Malhi et al., 2008; Hector et al., 2011; Wood et al., 2012). Литература по вьетнамским лесам и конкретно по объекту исследований приведена в разделе 2.1.

Сезонно-влажные листопадные и полулистопадные тропические леса Юго-Восточной Азии имеют сравнимое с влажными тропическими лесами Амазонии видовое разнообразие (Vandekerkhove et al., 1993) и первичную продукцию, но сильно отличаются сезонными контрастами в увлажнении и приходе солнечной радиации (при высокой доступности влаги и тепла в годовом цикле). Функционирование листопадных и полулистопадных тропических лесов Юго-Восточной Азии слабо изучено, в то время как значительные различия в увлажнении и приходе солнечной радиации в течение года дают возможность проследить особенности взаимосвязей между потоками тепла, влаги и углекислого газа в контрастных условиях.

1.3. Текущие и прогнозируемые изменения климата в тропиках

Погодные и климатические условия служат важными рамками жизнедеятельности экосистем. Направленные изменения климата вызывают климатогенные сукцессии; аномальные погодные условия могут служить

триггером катастрофических изменений в структуре экосистем. В ответ на изменения климата меняется и энерго- и массообмен земной поверхности.

При глобальных изменениях климата значительно сильнее изменяется климат высоких широт, так как в высоких широтах осуществляется положительная обратная связь температуры с таянием снежного покрова. Повышение температуры вызывает таяние снежного покрова – резко снижается альбедо (отражательная способность поверхности) – поверхность прогревается гораздо сильнее – температура повышается еще значительно (Кислов, 2001). Так, в минимуме последнего ледникового периода (20 000 л.н.) глобальная температура по Земле опускалась на 2 °C (Информационные..., 1997), температура в Антарктике падала на 8 °C (Petit et al., 1999), а в центре Восточно-Европейской равнины – более чем на 12 °C (Novenko et al., 2009) относительно референсного 30-летнего периода, принятого за «современный климат», 1961-1991 года. Однако в равнинных частях тропиков, в частности, в низменностях Индонезии и в Амазонии, температура снижалась не более чем на 1-2 °C (Farrera, 1999) относительно 30-летнего периода с 1961 по 1991 год, над океанами умеренных и тропических широт – еще меньше.

Глобальное потепление 2-й половины XX века затронуло и тропические области, температура в которых выросла на 0.2-1 °C (IPCC, 2007). В частности, по данным станций в Южном Вьетнаме Хошимин, Донг Соай и Фьюк Лонг за период 1980-2010 гг. статистически значимо увеличиваются суммы осадков сухого полугодия (ноябрь–апрель) и растет температура во все месяцы, кроме самых жарких – марта, апреля и мая (под статистической значимостью подразумевается значимость роста средних значений между 1-й половиной периода и 2-й половиной периода с помощью *t*-теста при уровне значимости $\alpha=0.05$) (Дещеревская и др., 2013). Средняя годовая сумма осадков увеличилась, но рост статистически пока незначим (прибавилось 150–250 мм за год при стандартном отклонении $\sigma = 460$ мм). Среднегодовая температура увеличилась на 1.1–1.2 °C (при стандартном отклонении $\sigma = 0.4–0.7$ °C). Рост температуры

происходит в основном за счет самых прохладных месяцев: января (на 1.8–2.2 °C при $\sigma = 1-1.1$ °C) и декабря (на 2.3–2.4 °C при $\sigma = 0.9$ °C). В общем, сезонность климата снижалась, и по климатической классификации Алисова (Хромов, Петросянц, 2001) из субэкваториального климат Южного Вьетнама очень медленно смещался в сторону экваториального. Потепление пока не затронуло самые жаркие месяцы, поэтому не увеличилась максимальная температура в годовом ходе. Однако увеличение средней месячной температуры в сухой сезон на 2-4 °C, вплоть до многолетних максимумов, наблюдается в годы сильных периодических явлений Эль-Ниньо (Дещеревская и др., 2013).

К концу XXI века прогнозируется увеличение глобальной температуры на 1.8-4.0 °C, при этом температура в тропиках Юго-Восточной Азии может вырасти на 2.0-2.5 °C (IPCC, 2007). Вероятно, такое изменение может быть значительным для тропических экосистем, потому что тропические экосистемы в ходе эволюции адаптировались к узкому диапазону температуры (Ричардс, 1961).

Глава 2. Объект и метод

В первой части главы дана характеристика объекта исследования – муссонного тропического леса Южного Вьетнама; рассматривается его история; приводится дискуссия о возможной степени нарушенности; выявлена специфика сезонности, отличающая лес как от постоянно влажных, так и от сезонно-влажных тропических лесов. Во второй части главы рассматривается теоретическая база, достоинства и ограничения метода исследования – метода пульсационных наблюдений, а также приводится характеристика анализируемой базы данных.

2.1. Объект исследования - муссонный тропический лес Национального парка Кат Тьен

Объектом исследования является тропический муссонный долинный высокоствольный лес национального парка Кат Тьен, сформировавшийся на темноцветных ферраллитных почвах, подстилаемых базальтами (Фридланд, 1964; Кузнецов и Кузнецова, 2011; Аничкин, 2011). Экспериментальная площадка пульсационных наблюдений имеет координаты 11°26'30"N, 107°24'04"E и абсолютную высоту 144±10 м. Карты рельефа, растительности, почв в Кат Тьене приведены в Приложении 1.

Физико-географическая характеристика Национального парка Кат Тьен. Национальный парк Кат Тьен (далее – Парк) частично захватывает три провинции Вьетнама: Донг Най (Đồng Nai), Бинь Фюк (Bình Phước) и Лам Донг (Lâm Đồng) (Структура..., 2011). Лесной массив Нам Кат Тьена вошел в национальный парк Кат Тьен в конце 1997 года, а в ноябре 2001 г. Парк получил

статус биосферного заповедника ЮНЕСКО (WWF..., 2001). В провинции Донг Най расположен южный сектор Парка площадью 38 302 га, Нам Кат Тьен, который ранее выделяли отдельно наряду с Тай Кат Тьеном и Кат Локом. В логике этого разделения первая вьетнамская точка пульсационных наблюдений в региональной сети Asiaflux была названа NCT – Nam Cat Tien. К 2012 г. все три сектора объединены под общим названием Кат Тьен (транслитерация названия парка дана в варианте, сложившемся традиционно за 20 лет исследований в Российско-Вьетнамском Тропическом научно-исследовательском и технологическом центре). Южный сектор включает равнинную территорию с абсолютной высотой 130-150 м, плакорные участки которой имеют относительно однородную растительность. Территория окружена холмами с высотами до 250-300 м; карты рельефа, геологии, почв позволяют предположить, что равнинная восточная часть Кат Тьена является разрушенным кратером плейстоценового вулкана (The nomination..., 2007). Равнинные тропические почвы обычно бедны органическим веществом в силу длительного выветривания и вымывания органических соединений большим количеством осадков; напротив, почвы большей части Кат Тьена формировались на относительно молодых (поздний плейстоцен – ранний голоцен) вулканическом базальтовом туфе (Whitford-Stark, 1987), и поэтому сравнительно плодородны (The nomination..., 2007). Содержание гумуса в гумусовом горизонте в почвах около 5% (С орг 2-3%), по классификации Гришиной и Орлова – среднее; высока обогащенность верхних гумусовых горизонтов азотом (И. Курганова, Т. Мякшина, личное сообщение) и фосфором (Аничкин, 2008). О благоприятных химических характеристиках почвы в Кат Тьене сообщается в работе Бланка (Blanc et al., 2000).

Восток и север равнинной части Парка ограничены крупной рекой Донг Най, являющейся второй по величине в Южном Вьетнаме после Меконга. В центре равнины расположена система озер с самым крупным озером Бай Сау. В сухой сезон озеро изолировано от реки Донг Най, уровень воды в Донг Нае падает на 5-6 метров, а в озерах в центральной части Парка на 4 м (The nomination...,

2007), мелкие ручьи и реки пересыхают. Во влажный сезон озера, многочисленные временные водоемы и образовавшиеся водотоки объединяются в единую водную систему. Водный режим почв периодически промывной: в сухой сезон на 3-5 месяцев устанавливается непромывной режим почв, в то время как во влажный сезон иногда почва достигает состояния полного насыщения влагой, и на поверхности стоит вода.

Лес равнинной части Кат Тьена характеризуется высоким видовым разнообразием (более 80 видов деревьев) и сложной вертикальной структурой (3-5 подъярусов). Согласно ботаническому описанию (Кузнецов и Кузнецова, 2011), на дренированных участках основными лесообразующими видами являются *Lagerstroemia calyculata* (Lythraceae), *Haldina cordifolia* (Rubiaceae), *Tetrameles nudiflora* (Datiscaceae), *Afzelia xylocarpa* (Caesalpinaceae), *Sterculia cf. cochinchinensis* (Sterculiaceae), на сезонно заливаемых участках – *Dipterocarpus alatus* (Dipterocarpaceae), *Hopea odorata* (Dipterocarpaceae), *Hydnocarpus cf. anthelmintica* (Kiggelariaceae); на желтых ферраллитных почвах на сланцах – *Dipterocarpus turbinatus*, *Shorea roxburghii* (Dipterocarpaceae), *Swintonia floribunda* (Anacardiaceae), *Sandoricum koetjape* (Meliaceae). Многочисленны лианы, эпифиты и полуэпифиты. Травянистый ярус фрагментарен. По числу видов наиболее многочисленны семейства *Annonaceae*, *Euphorbiaceae*, *Lauraceae*, *Rubiaceae*, *Sterculiaceae* (для более полной информации см. Приложение 2: таксономический состав лесной растительности и профильные диаграммы древостоя). Авторы (Кузнецов и Кузнецова, 2011), основываясь на сравнительной характеристике видового состава древостоев Кат Тьена и других лесов Южного Вьетнама, считают, что леса Кат Тьена первичны, а не появились на месте бывших расчисток.

Характеристики листопадности леса в Кат Тьене. Лес является полулистопадным: первый и частично второй подъярус деревьев сбрасывает листья в сухой сезон; нижние подъярусы меняют листья постепенно в течение всего года. Часть видов деревьев сразу после листопада выпускает листья новой генерации, часть – остается в безлистном состоянии в течение 2-4 месяцев.

Оказалось удобным отслеживать фенологические изменения по серии последовательных фотографий полога с фиксированной точки на вышке через каждые 3-5 дней в течение сухого сезона (Рисунок 1). В ходе работы впервые получена серия последовательных фотографий с разницей в несколько дней полога леса в национальном парке Кат Тьен за сухой сезон 2012-2013 годов. Одна фотография с высоты 47 м (высота полога около 36 м) позволила отслеживать состояние 86 индивидуальных крон деревьев 1-2 подъяруса (Рисунок 2).

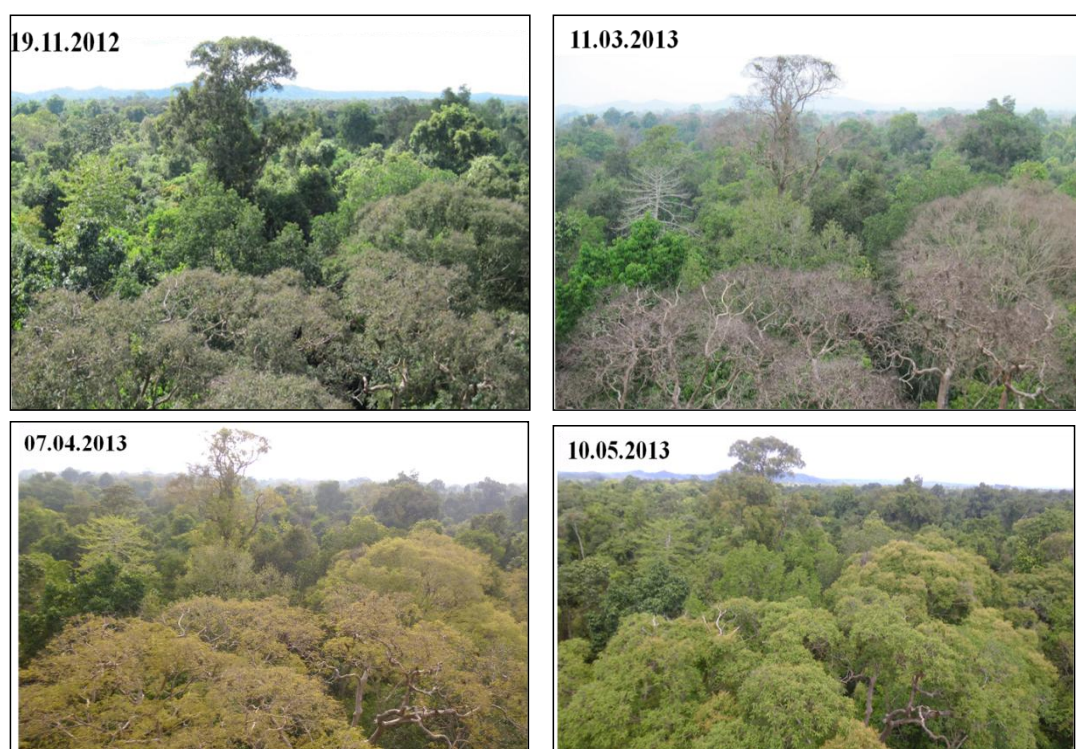


Рисунок 1 – Фотографии полога леса в сухой сезон 2012-2013 гг. и в начале влажного сезона 2013 года

Начиная с 21 февраля полностью распустились первые деревья, сменившие листву – предположительно, афзелии, *Afzelia xylocarpa* (на серии фотографий хорошо различимы молодые листья бордового цвета, через неделю-две становящиеся ярко-зелеными). В пик сухого сезона 2012-2013 гг. (1-я половина марта 2013 г.) в безлистном состоянии находилось 48 % деревьев верхних подъярусов (Рисунок 3).

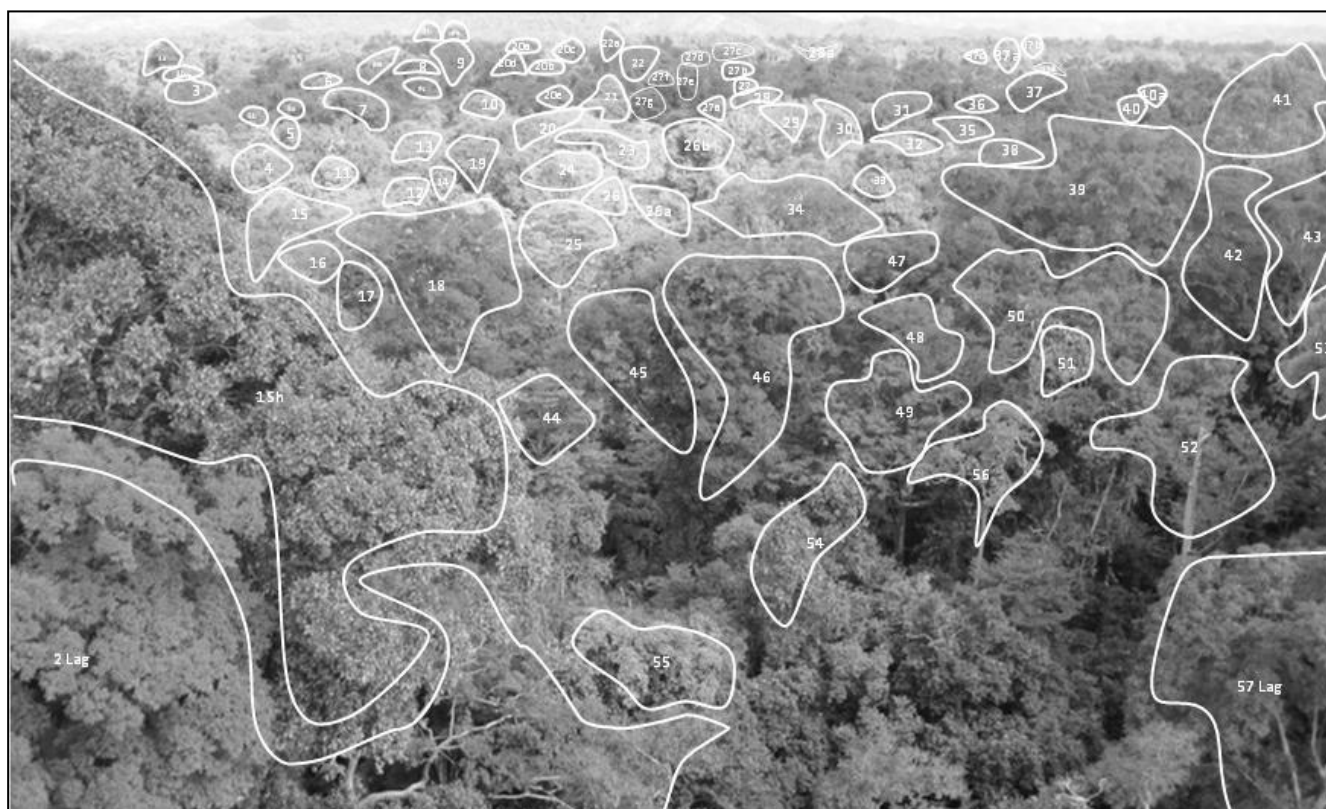


Рисунок 2 – Выделение индивидуальных крон деревьев 1-2 подъяруса из полога леса



Рисунок 3 – Соотношение древесных особей с листьями прошлого года, опавших деревьев и деревьев, сменивших листву в сухой сезон 2012-2013 годов

Лагерстремии (*Lagerstroemia calyculata*) и виды со сходной фенологией, составившие треть всех деревьев, на фотографиях выделяются по долгому пребыванию в безлистном состоянии, бурым цветом крон в декабре в связи с массовым плодоношением, белым цветом коры и ярким оранжево-красным

цветом крон перед листопадом. Массовое распускание лагерстремий состоялось около 7 апреля. Всего листья сменили 3/4 деревьев полога; остальные индивиды, по-видимому, меняют листья постепенно в течение года. Новые листья развернулись к середине апреля.

В сентябре 2013 г. проведены рекогносцировочные исследования листового индекса (LAI, leaf area index) при помощи лаиметра LP-80. Согласно измерениям вдоль транссекты длиной 200 м на ЮЗ от точки измерений, под кронами крупных деревьев листовой индекс составлял $5.5-6.5 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$; в лесных окнах $3.0-4.5 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$; в среднем $5.1 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$. Это меньше, чем в аналогичных лесах: к примеру, на станции Пасо в Малайзии диптерокарповый равнинный лес имеет ЛАИ около 6.5 (Kosugi et al., 2012). Возможно, пониженный листовой индекс связан с повышенным фоном нарушенности леса Кат Тьен, большим количеством довольно открытых лесных окон.

Нарушенность лесов Кат Тьена. Вопрос нарушенности лесов Кат Тьена связан с новейшей историей. Во время американо-вьетнамской войны леса Парка обрабатывались гербицидами, но менее активно, чем более южные и западные массивы. Причина невысокой интенсивности военных действий, по-видимому, лежит (!) в свойствах грунтов Кат Тьена. Почвы равнинной части Парка неглубоки; глубже 80-100 см начинается материнская порода с обилием крупных глыб базальта. Много камней лежит на поверхности земли. Такая почва трудно поддается земляным работам. В отличие от соседнего массива Ма Да, в Кат Тьене нет подземных ходов партизан.

Нужды сельского хозяйства – важнейший фактор сведения переменновлажных тропических лесов, так как эти леса часто расположены в районах с подходящей почвой для земледелия и для выпаса скота (Seasonally..., 2011, chap. 3). Скорее всего, по причине каменистой и неглубокой почвы центральная часть равнинного Кат Тьена никогда не расчищалась под сельскохозяйственные нужды. Это аргумент в пользу предположения, что лес Кат Тьена первичен. Леса Парка сохранили сложную структуру и богатое биоразнообразие, характерное для первичных лесов Юго-Восточной Азии.

Однако территория Парка все же не избежала влияния человека. О нарушении свидетельствуют и исторические, и ботанические факты (Кузнецов и Кузнецова, 2011; Blanc et al., 2000; личное сообщение А.Н. Кузнецова), излагаемые далее.

Одним из способов оценки нарушения леса является изучение характеристик древостоя: соотношения коренных и экотонных видов, распространенности видов, представляющих коммерческий интерес, сравнительного анализа величины биомассы.

По фотографиям лесного полога в центральной части Кат Тьена в 2011-2012 гг., сделанным с метеорологической вышки, вид лагерстремиа (*Lagerstroemia calyculata*, сем. *Lythraceae*) составляет около 37 % верхнего подъяруса. По данным Бланка, на 3-х из 4-х точек в изучаемом массиве леса лагерстремиа доминировала, хотя подрост лагерстремии редкий либо отсутствует и в будущем ее доля постепенно будет снижаться (Blanc et al., 2000). На преобладание в Кат Тьене леса с доминированием лагерстремии указывает и Вандекеркхове (Vandekerkhove et al., 1993). В Южном Вьетнаме вид *Lagerstroemia calyculata* достаточно обычен, он «может присутствовать в пологе единично, а может образовывать чистые древостои» (Кузнецов и Кузнецова, 2011). Лагерстремиа возобновляется в прогалинах и по обочинам дорог; под сплошным пологом леса подрост лагерстремии отсутствует. Это позволяет назвать лагерстремию экотонным видом для Кат Тьена, в отличие от пионерных видов, способных к возобновлению после сплошных расчисток, а также коренных видов, способных к возобновлению под пологом леса. Низкоплотная древесина, являющаяся результатом быстрого роста, а также относительно короткий жизненный цикл дерева и его листьев – черты раннесукцессионных видов относительно видов поздней сукцессии (Nogueira et al., 2004). Светлая кора, служащая для защиты от прямых солнечных лучей, и относительно легкие семена, разносимые ветром и птицами, также подтверждают гипотезу принадлежности лагерстремии к раннесукцессионным видам. Таким образом, в Кат Тьене в районе исследований очень распространен экотонный,

раннесукцессионный вид – лагерстремия. Эта особенность видового состава леса может быть связана как с наиболее подходящим для лагерстремии эдафотопом, так и с нарушенностью леса, природной или антропогенной.

Менее представленное в верхнем подъярусе, однако распространенное семейство Диптерокарповые (*Dipterocarpaceae*), напротив, имеет черты видов поздней сукцессии: твердая древесина, более долгий жизненный цикл и большая продолжительность жизни отдельных листьев, плотные тяжелые плоды-орехи (Nogueira et al., 2004).

А. Новичонок считает, что доказательством нарушенности леса служит преобладание «естественно восстанавливающегося» леса с заниженной биомассой над «зрелым лагерстремовым» в равнинной части Кат Тьена, как это видно из карт леса (Novichonok et al., 2012).

Природная нарушенность на центральных участках равнинной части Кат Тьена может быть обусловлена мелкими почвами (Blanc et al., 2000), вызывающими более интенсивный вывал деревьев и лучшие конкурентные условия для экотонных видов. Иными словами, глубокие почвы приводят к формированию сообществ с более низким фоном природной нарушенности.

Деятельность человека в Кат Тьене интенсифицировалась во второй половине 20 века, особенно в 90-е гг. (Кузнецов и Кузнецова, 2011; личное сообщение А.Н. Кузнецова). Велась выборочные рубки спелых деревьев, имеющих ценную древесину – в основном из семейств бобовые (*Fabaceae*) и диптерокарповые (Blanc et al., 2000; Кузнецов и Кузнецова, 2011; личное сообщение А.Н. Кузнецова). На стволах деревьев семейства *Dipterocarpaceae* отмечены огневые раны, которые наносились для получения смолы (Blanc et al., 2000; личное сообщение А.Н. Кузнецова). Огневые раны ослабляют дерево и ведут к его меньшей конкурентоспособности. Что же касается лагерстремий, их стволы в Кат Тьене (что тоже, по-видимому, связано с условиями эдафотопа) часто имеют большие пустоты и дупла, что делает их древесину малопривлекательной для промышленного использования; выборочные рубки могли приводить к относительной обогащенности леса лагерстремией. Полог,

возможно, обеднен диптерокарповыми, место которых частично могли занять лагерстремии бывшего 2-го и 3-го подъярусов, получившие естественные преимущества. В итоге, верхний подъярус древостоя разрежен и в нем преобладают виды, более характерные для лесных окон.

Для данной работы вопрос нарушенности леса является важным, т.к. виды диптерокарповых («коренные») имеют иной фенологический ритм, чем лагерстремии («экотонные»). Диптерокарповые после массового листопада сразу распускают листья новой генерации, в то время как лагерстремии в течение нескольких месяцев стоят без листьев. Естественно, данная особенность должна отражаться в величине транспирации и фотосинтеза лесного полога. Таким образом, возможно, что «нечтупрешенный» лес Кат Тьена был бы менее сезонным и более близким к влажным тропическим лесам.

Из возможной нарушенности возникает и предположение о возможности леса по долгосрочному увеличению биомассы и депонированию дополнительного углерода (Novichonok et al., 2012). В отсутствие нарушений позднесукцессионные виды в ходе конкуренции постепенно вытесняют раннесукцессионные виды, т.к. коренные виды нуждаются в меньшем количестве ресурсов (Nogueira et al., 2004). Оценить реальную степень нарушений и их возможные причины можно только в ходе дополнительных исследований лесов Кат Тьена. Более полную картину причин формирования древостоев с описанными выше особенностями может дать только дополнительное исследование отпада деревьев и сохранившихся с времен рубок пней.

Многоярусные муссонные леса в функциональной классификации тропических лесов. Для сравнения функций экосистемы муссонных тропических лесов Юго-Восточной Азии с другими тропическими лесами мира важно представлять их положение в ряду всех тропических лесов. Тропические леса в зависимости от увлажнения можно расположить в непрерывной шкале от постоянно влажных до ярко выраженных сезонных, сбрасывающих листья на срок до 6 месяцев (Ричардс, 1961). В этой шкале постоянно влажные леса будут демонстрировать минимум сезонности и она будет скорее характерна для

отдельных видов, чем для леса в целом. С удалением от экватора и появлением выраженного сухого сезона увеличивается количество листопадных видов, сначала в верхнем подъярусе, затем в следующих; снижается биоразнообразие и сложность структуры леса. Однако, на эту общую картину накладываются особенности эдафотопы: в климате со схожими параметрами сухого сезона могут произрастать как леса с одним древесным ярусом, так и леса со сложной многоярусной структурой (Кузнецов и Кузнецова, 2011).

Тропические леса в самом грубом приближении разделяют на постоянно влажные и переменно влажные (или сезонные). К сезонным относятся леса, произрастающие при среднегодовой температуре больше 17 °C, осадках от 250 до 2000 мм, отношении потенциальная эвапотранспирация/осадки больше единицы. Однако более существенным критерием является выраженная сезонность: сухой сезон (в каждый месяц выпадает менее 100 мм осадков) длится 4-6 месяцев (Seasonally..., 2011). Для лесов Кат Тьена длительность сухого сезона (4 месяца) невелика относительно других сезонных лесов; при этом выпадает большая сумма осадков, около 2600 мм, что сближает леса Кат Тьена с влажными тропическими лесами.

По карте экорегионов мира (Olson et al., 2001) леса южной равнинной части Вьетнама (Кохинхины) относятся к «тропическим сухим широколиственным лесам» в противоположность «тропическим влажным широколиственным лесам». К сухим тропическим лесам отнесено 42 % всех тропических лесов; в основном они сосредоточены в Южной Америке; леса континентальной Южной и Юго-Восточной Азии составляют около 17 % всех сухих тропических лесов. Классификация Олсона отражает, в принципе, скорее климатический аспект существования южновьетнамских лесов: наличие 4-месячного сухого сезона, в котором сумма осадков в каждый месяц ниже 100 мм. При этом большая годовая сумма осадков, солнечной радиации, а также особенности грунтов позволяют расти в Кат Тьене лесу, физиономически и функционально значительно отличающемуся от классических сухих тропических лесов и даже более похожему на влажные тропические леса. Леса Кат Тьена

имеют несколько древесных подъярусов, высокое биоразнообразие (80 фоновых древесных видов относительно в среднем 30 у сухого тропического леса) и высокий уровень активности в сухой сезон: остаются облиственными все древесные подъярусы, кроме первого и частичного второго. Сухие сезонные леса (классический пример – леса Индии) имеют обычно один древесный ярус; все деревья сбрасывают листья в сухой сезон (Ravindranath et al., 1997). Неточность классификации, основанной на макроклиматических параметрах, в данном случае отражает повышенную роль мезоклиматических параметров и локальных особенностей почвы в формировании и функционировании сезонно-влажного тропического леса. В картах глобальной растительности мезо- и микромасштабные особенности не могут быть учтены в силу мелкого масштаба. Так как в тропиках тип климаксного леса очень сильно зависит от мезоусловий (Кузнецов, 2003), возможно, в целях охраны тропических лесов важнее опираться на карты с более крупным масштабом: по крайней мере, стран. «Влажными» в функциональной логике могут быть названы леса, в которых запас влаги на сухой сезон позволяет осуществлять круглогодичную вегетацию и снижает метаболические показатели, допустим, менее чем на 50 %. В классификации тропических лесов необходимо учитывать функциональный аспект, в частности, сезонный ход энерго- и массообмена.

2.2. Метод пульсационных наблюдений и сопутствующие измерения

Основным методом, использовавшимся в работе для получения потоков тепла, влаги и углекислого газа, был метод пульсационных наблюдений. Метод пульсационных наблюдений (Волков и др., 1968; Братсерт, 1985; Baldocchi et al., 1988; Verma, 1990; Goulden et al., 1996; Massman, Lee, 2002; Baldocchi, 2003; Gockede et al., 2004; Papale et al., 2006; Eddy covariance..., 2012; Burba, 2013)

позволяет оценить суточные и сезонные потоки тепла, H_2O и CO_2 между экосистемой и атмосферой, а также зависимость потоков от метеорологических условий. Пульсационные приборы устанавливаются на специальной мачте, возвышающейся над растительным пологом не менее чем на треть высоты растительности (отсюда еще одно английское название метода пульсационных наблюдений – tower-based method или просто tower method).

Метод основан на измерении высокочастотных (10-20 Гц) колебаний 1) трех компонентов скорости ветра: двух по горизонтальным осям (u , v), перпендикулярным друг другу, и одной по вертикальной оси (w), 2) температуры (T) и 3) концентраций водяного пара и углекислого газа. Величины (1)-(2) измеряются ультразвуковым (УЗ) анемометром-термометром, (3) – инфракрасным (ИК) газоанализатором малой инерционности открытого или закрытого типа.

Английское распространенное название метода (eddy covariance, букв. вихревая ковариация) отражает способ расчета вертикального турбулентного потока тепла, влаги или углекислого газа. Ковариация есть произведение мгновенных отклонений (пульсаций) величин. Так, поток тепла рассчитывается как осредненное произведение пульсации вертикальной скорости ветра w' на пульсацию температуры T' . Потоки влаги и углекислого газа — произведение пульсации вертикальной скорости w' на пульсацию концентрации водяного пара q' или углекислого газа c' .

Теоретическая база метода включает теорию турбулентности (Reynolds, 1895), примененную к энерго- и массообмену в атмосфере (Montgomery, 1948; Обухов, 1951; Swinbank, 1951). Базовыми физическими уравнениями являются законы сохранения импульса, энергии и массы, а также уравнение турбулентного переноса.

Ниже будет рассмотрено уравнение сохранения массы и энергии в нижнем слое атмосферы, описывающее энерго- и массообмен, и уравнение вертикального турбулентного потока, на котором непосредственно базируется пульсационный метод.

Поток субстанции c (водяного пара или других малых газовых составляющих атмосферы – CO_2 , CH_4 , N_2O и т.д.) на некоторой высоте h над поверхностью описывается следующим уравнением (сохранения массы в дифференциальной форме):

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial \rho_c}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_c}{\partial y} + w \frac{\partial \rho_c}{\partial z} \right) + N - St + D, \quad (1)$$

1 2 3 4 5 6 7

где ρ_c есть плотность (или концентрация) некоторой субстанции; u , v , w – две горизонтальные (по осям x и y) и вертикальная (по оси z) компоненты скорости ветра; N – поглощение или отдача субстанции поверхностью; St – изменение запаса субстанции ниже высоты h (знак St выбран так, что если запас увеличивается, то некоторое количество субстанции на высоте измерений h недоучитывается); D – молекулярная диффузия.

Член (1) есть изменение плотности субстанции в точке за интервал времени t . Члены (2) и (3) представляют собой горизонтальный перенос (адвекцию). Член 4 представляет собой вертикальный перенос субстанции. Член 5 – поглощение или отдача субстанции поверхностью за определенный интервал времени – называется также обменом субстанции.

Далее принимается ряд упрощений уравнения (1), учитывая специфику применения уравнения для нижних 50-100 м (приземного слоя) атмосферы для однородной по горизонтали поверхности. Если поверхность горизонтально однородна, то адвекция незначительна, т.е. члены (2) и (3) приравниваются к нулю. В тропосфере перенос путем диффузии D является малой величиной по сравнению с турбулентным переносом и может быть опущен. Так как источником тепла, водяного пара и малых газовых составляющих для атмосферы является земная поверхность, а также потому, что в нижних 50-100 м атмосферы (приземном слое) потоки с поверхности приблизительно постоянны, то в момент времени t вертикальный поток субстанции на высоте h $w \frac{\partial \rho_c}{\partial z}$ равен сумме обмена N и изменения запаса St в слое h :

$$w \frac{\partial \rho_c}{\partial z} = N - St \quad (2)$$

1 2 3

Уравнения (1) и (2) могут быть расширены: в качестве субстанции может рассматриваться любая скалярная величина, в частности, тепло.

Таким образом, искомой величиной в исследованиях энерго- и массообмена земной поверхности и атмосферы является второй член уравнения (2) N . Для определения N измеряется поток субстанции на высоте h с помощью пульсационного метода и изменение запаса субстанции St с помощью измерений вертикальных профилей концентрации субстанции ниже h . Если задачей исследования является определение суммарного обмена за некий период времени, потоки в каждый момент времени складываются, т.е. уравнение (1) интегрируется по времени.

Вторым базовым уравнением, рассматриваемым ниже, будет уравнение вертикального потока (3), из которого выводится формула для турбулентного потока (изложение вывода формулы по (Burba, 2013)):

$$F = \overline{\rho_a w s}, \quad (3)$$

где ρ_a есть плотность (или концентрация) некоторой субстанции; w – вертикальная (по оси z) компонента скорости ветра; $s = \rho_s / \rho_a$ – отношение плотности субстанции к плотности воздуха (массовая доля субстанции).

В разложении Рейнольдса каждую переменную представляют в виде суммы среднего (обозначено волной) и отклонения, или пульсации (обозначено штрихом):

$$F = (\tilde{\rho}_a + \rho'_a)(\tilde{w} + w')(\tilde{s} + s'), \text{ или} \quad (4)$$

$$F = \tilde{\rho}_a \tilde{w} \tilde{s} + \rho'_a \tilde{w} \tilde{s} + \tilde{\rho}_a w' \tilde{s} + \tilde{\rho}_a \tilde{w} s' + \rho'_a w' \tilde{s} + \tilde{\rho}_a w' s' + \rho'_a \tilde{w} s' + \rho'_a w' s' \quad (5)$$

1 2 3 4 5 6 7 8

Далее принимается ряд упрощений и гипотез:

1). Осреднение отклонения от среднего приравнивается к нулю, в результате чего члены, содержащие одну пульсацию (№ 2, 3, 4), исчезают; при

этом две пульсации могут коррелировать друг с другом, поэтому члены с двумя пульсациями сохраняются;

2). Принимается, что флуктуации плотности воздуха ρ'_a малы по сравнению с флуктуациями других величин, поэтому приравниваются к нулю также члены № 5, 7, 8; однако в некоторых условиях флуктуации плотности воздуха могут быть заметными по сравнению с флуктуациями других величин, поэтому для их учета вводится специальная поправка, о которой говорится ниже;

3). Средний вертикальный поток над поверхностью земли $\bar{w}$ отсутствует, поэтому исчезает также член № 1.

В итоге получаем базовую формулу пульсационного метода:

$$F = \overline{\tilde{\rho}_a w' s'} \quad (6)$$

Иными словами, вертикальный турбулентный поток равен осредненной по времени ковариации (произведению пульсаций) вертикальной скорости ветра и массовой доли субстанции, домноженным на среднюю плотность воздуха. Стандартные приборы измеряют именно массовую долю субстанции, поэтому необходимо вводить плотность воздуха. С учетом коэффициентов, выражающих концентрации субстанций из распространенных измеряемых величин (температуры и массовой доли водяного пара), формулы для потоков тепла и водяного пара можно представить как:

$$H = c_p \rho_a \overline{w' T'} \quad (7)$$

$$LE = L_v \frac{\rho_a}{M_{H_2O}} \overline{w' \mu'_{H_2O}} \quad (8)$$

Здесь c_p - удельная теплоемкость воздуха, L - удельная теплота парообразования ($2420000 \text{ Дж кг}^{-1}$), E - испарение в кг воды, L_v - удельная молярная теплота испарения (в Дж моль^{-1}), M_{H_2O} - молекулярная масса водяного пара (в кг моль^{-1}) и μ_{H_2O} - молярная концентрация водяного пара (в моль на 1 моль воздуха), равная массовой доле водяного пара в воздухе.

Итого, основные гипотезы, принимаемые в прямом методе измерения турбулентных потоков, таковы:

- перенос путем молекулярной диффузии мал по сравнению с турбулентным переносом (в приземном слое атмосферы выполняется);
- горизонтальная адвекция незначительна (что достигается однородностью поверхности, т.е. отсутствием больших водоемов, выраженных форм рельефа, одинаковой структурой растительности в схожих местообитаниях);
- средний вертикальный поток отсутствует (что достигается в условиях равнинного рельефа без уклонов);
- флуктуации плотности воздуха малы по сравнению с флуктуациями скорости ветра и субстанции (реально эти флуктуации могут изменять потоки на значительную величину, поэтому применяется соответствующая поправка, так называемая WPL-коррекция);
- процессы стационарны за время осреднения (общепринятым временем осреднения является 30 мин), т.е. $\partial X / \partial t = 0$, где X может принимать значения горизонтальной, вертикальной скорости ветра, температуры и т.д. (выполняется в случае отсутствия резких изменений погоды; часто нарушается в утренние часы при развитии турбулентности и в вечерние часы при ее затухании);
- изменения потоков с высотой не должны превышать 10-20 % (в приземном слое атмосферы в общем выполняется).

В методе пульсационных наблюдений используется ряд поправок, связанных с типами используемого оборудования и необходимостью приближать неидеальные условия измерений к идеальным условиям, к которым применима теория метода:

- поправка на временную задержку одних флуктуаций относительно других, достигается поиском максимальной корреляции пульсаций;
- исключение выбивающихся значений и значений, лежащих вне физически адекватных диапазонов (возможны при ошибках приборов и передачи сигнала, перебоях электроснабжения и т.д.)
- перекрестная коррекция для ветра/влажности для ультразвукового (УЗ) анемометра;

- вращение координат для УЗ анемометра, в настоящее время при наличии большого массива данных (более месяца) оптимальным считается метод подбора плоскости (planar fit);
- поправка на потери потоков в низкочастотной и высокочастотной части спектра. Потери обусловлены заданным пространственным разделением приемно-передающих частей датчиков, расстоянием между приборами и работе на определенной частоте (5-20 Гц);
- коррекция потока тепла вследствие того, что УЗ анемометр-термометр измеряет температуру воздуха с помощью звука (т.н. звуковую температуру);
- поправка на флуктуации плотности воздуха (WPL-коррекция);
- тест на стационарность;
- тест на развитие турбулентности.

Помимо последних двух тестов, для оценки качества потоков используется ряд иных статистических тестов: на выбивающиеся значения, на достаточность разрешения приборов, на выпадающие значения (сниженные или завышенные значения в некоторый период времени), на соответствие абсолютным порогам, статистические моменты второго порядка, разрывы.

Фиксируемые приборами пульсации характеризуют не единственную точку, в которой находится измерительная мачта, а некоторую область вокруг этой точки. Размер области определяется скоростью и направлением ветра, а также высотой мачты и средней высотой растительности. Эта область называется футпринтом и может быть рассчитана с помощью моделей. Так, можно рассчитать область, с которой собирается 50 % потока; область, с которой собирается 90 % потока и так далее. Таким образом, измеряемые потоки являются результатом наложения пространственных сигналов точек, находящихся на различном расстоянии от мачты – для лесных биоценозов обычно от нескольких сотен метров до нескольких километров (Göckede et al., 2004). Чем более развита турбулентность и интенсивнее вертикальное перемешивание, тем меньше футпринт. Дневной футпринт, как правило, меньше ночного, т.к. ночью в стабильных атмосферных условиях сигнал от какой-либо точки в кронах деревьев

переносится на большее расстояние по горизонтали, пока поднимается до высоты измерительных приборов. Таким образом, пульсационный метод оценивает потоки тепла и влаги, пространственно осредненные до масштабов биогеоценозов.

Измерительная система в Кат Тьене начала функционировать в ноябре 2011 года. Пульсационные приборы работают на частоте 10 Гц. Применяется инфракрасный газоанализатор открытого типа LI-7500A. Высота мачты (вышки) составляет 50 м при средней высоте полога 36-37 м (таким образом, мачта на 1/3 возвышается над кронами). Приборы объединены в три независимые системы («Eddy Covariance», «Профиль температуры» и «Профиль CO₂»), структура которых суммирована в Таблице 1 и на Рисунках 4 и 5. Положение пульсационных и метеорологических датчиков на мачте и в почве показано на Рисунках 6 и 7.

Помимо пульсационных, проводились измерения основных метеорологических параметров над лесом, в пологе леса и в почве. Радиометром (двумя пиранометрами и балансомером) измерялись четыре независимых компонента радиации: 1) нисходящая коротковолновая (солнечная), 2) восходящая коротковолновая (отраженная пологом растительности), 3) восходящая длинноволновая радиация (излучение поверхности) и 4) нисходящая длинноволновая (встречное излучение атмосферы). При измерении длинноволновой радиации вводилась поправка на температуру датчика. Над пологом и под ним измерялась фотосинтетически активная радиация (*ФАР*). Измерение осадков над пологом растительности производилось при помощи дождемера с опрокидывающимся сосудом. Над пологом (на 50 м) и под ним (на 2 м) проводились измерения температуры и влажности воздуха. Скорость и направление ветра на 50 м высчитывалась по измерениям УЗ анемометра.

Профиль температуры воздуха снимался на 7 высотах: округленно 28, 19, 10, 5, 2, 1, 0.3 м. Воздухозаборы для определения профиля концентрации углекислого газа расположены на 8 высотах: округленно 46, 28, 19, 10, 5, 2, 1, 0.3 м. Температура и влажность почвы измерялась на 4-х глубинах: 5, 20, 30, 50

см, на каждой глубине в 3-х повторностях. Датчики потока тепла в почву и водного потенциала в 3-х повторностях были установлены на глубине 5-10 сантиметров.

Таблица 1 – Датчики измерительного комплекса

а). Система «Eddy Covariance»

№ п/п	Наименование	Место установки	Измеряемые параметры
1.	CSAT3 (Campbell Scientific, USA) 3D ультразвуковой анемометр	50 м над поверхностью земли	Скорость ветра по 3-м пространственным осям
2.	LI7500A (Li-Cor, USA) Газоанализатор открытого типа	50 м над поверхностью земли	Концентрация CO ₂ и водяного пара в воздухе, атмосферное давление
3.	HMP45C (Vaisala, Finland) Термометр-гигрометр	50 м над поверхностью земли	Температура и относительная влажность воздуха
4.	CS215 (Campbell Scientific, USA) Термометр-гигрометр	2 м над поверхностью земли, под пологом леса	Температура и относительная влажность воздуха
5.	LI190SB (Li-Cor, USA) Датчик ФАР (фотосинтетически активной радиации)	50 м над поверхностью земли	Фотосинтетически активная радиация (интенсивность, суммарный приход)
6.	LI190SB (Li-Cor, USA) Датчик ФАР	2 м над поверхностью земли	Фотосинтетически активная радиация (интенсивность, суммарный приход)
7.	NR01 (Hukseflux, Netherlands) 4-х компонентный радиометр	50 м над поверхностью земли	Восходящая и нисходящая длинно- и коротковолновая радиация (интенсивность, суммарный приход, альбедо)
8.	TE525MM (Texas Electronics, USA) Осадкомер	50 м над поверхностью земли	Количество осадков
9.	TCAV-L (Campbell Scientific, USA) Осредняющий термометр, 2 шт	В почве, на глубине 5 см	Температура почвы
10.	CS616 (Campbell Scientific, USA) Влагомер, 2 шт	В почве, на глубине 6 см	Объемная влажность почвы
11.	HFP01 (Hukseflux, Netherlands) Датчик потока тепла, 4 шт	В почве, на глубине 8 см	Поток тепла в/из почвы

б). Система «Профиль температуры»

№ п/п	Наименование	Место установки	Измерения
12.	T108 (Campbell Scientific, USA) Датчик температуры, 7 шт	28.17, 19.17, 10.17, 4.85, 2, 1, 0.3 м над поверхностью земли	Температура воздуха на разных высотах
13.	T108 (Campbell Scientific, USA) Датчик температуры, 12 шт	В почве, на глубинах 5, 20, 30, 50 см (по 3 шт на каждой глубине)	Температура почвы на разных глубинах
14.	CS616 (Campbell Scientific, USA) Влагомер, 12 шт	В почве, на глубинах 5, 20, 30, 50 см (по 3 шт на каждой глубине)	Объемная влажность почвы на разных глубинах
15.	257L (Campbell Scientific, USA) Датчик водного потенциала почвы, 3 шт	В почве, на глубине 5 см	Водный потенциал почвы
16.	HFP01 (Hukseflux, Netherlands) Датчик потока тепла, 3 шт	В почве, на глубине 8 см	Поток тепла в/из почвы

в). Система «Профиль CO₂»

№ п/п	Наименование	Место установки	Предназначение
17.	CO ₂ profile system (Campbell Scientific, USA) Система забора проб воздуха, 8 шт + LI820 (Li-Cor, USA) Газоанализатор закрытого типа	46.2, 28.2, 19.2, 10.2, 4.8, 2, 1, 0.3 м над поверхностью земли	Концентрация CO ₂ в воздухе

Система «Eddy covariance»:
 CSAT3, LI7500A, HMP45C, CS215, TE525MM
 NR01, LI190SBx2, почва: TCAVx2, CS616x2,
 HFP-01Lx4, CC-640

Система «Профиль температуры»:
 T108x7, почва: T108x12, CS616x12,
 257Lx3, HFP-01Lx3

Профиль CO₂ :
 забор воздухаx8

Рисунок 4 – Три различные системы датчиков измерительного комплекса

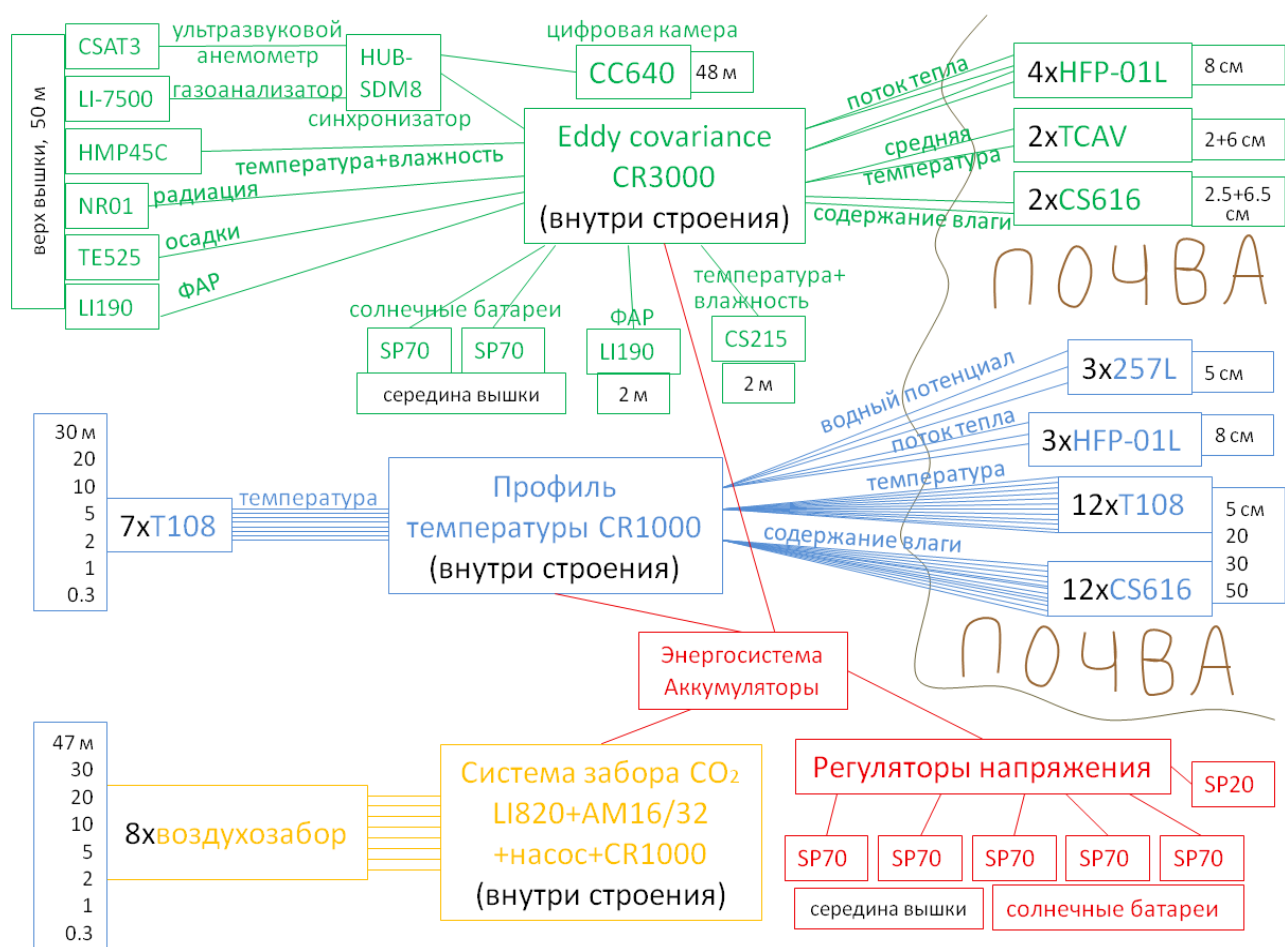


Рисунок 5 – Схема соединения систем датчиков и энергосистемы измерительного комплекса

Помимо пульсационных и метеорологических измерений, проводились исследования структуры и фенологии растительного сообщества, т.к. потоки энерго- и массообмена зависят от фенологического ритма экосистемы. Описание и результаты данных измерений приводились в главе «Объект исследования». В систему «Eddy Covariance» также входила цифровая камера CC640 (Campbell Scientific, USA), автоматически фотографировавшая полог леса 3-5 раз в день.

Система снабжалась энергией от 7 солнечных батарей. Энергия с батарей через регуляторы заряда поступала на гелиевые аккумуляторы CG12_150A (Vision, China), обеспечивавшие распределение накапливаемой за день энергии. Полученные от приборов данные собирались на накопители CR3000 и CR1000 (Campbell scientific, USA), на которых происходила первичная обработка сигнала и запись на флэш-карты, с которых данные далее переписывались на

персональный компьютер. Раз в несколько месяцев проводились калибровки LI-7500A по углекислому газу и воде с помощью баллона с азотом (где отсутствует CO_2 и H_2O), баллона с заданной концентрацией CO_2 и генератора воздуха заданной влажности LI-610.

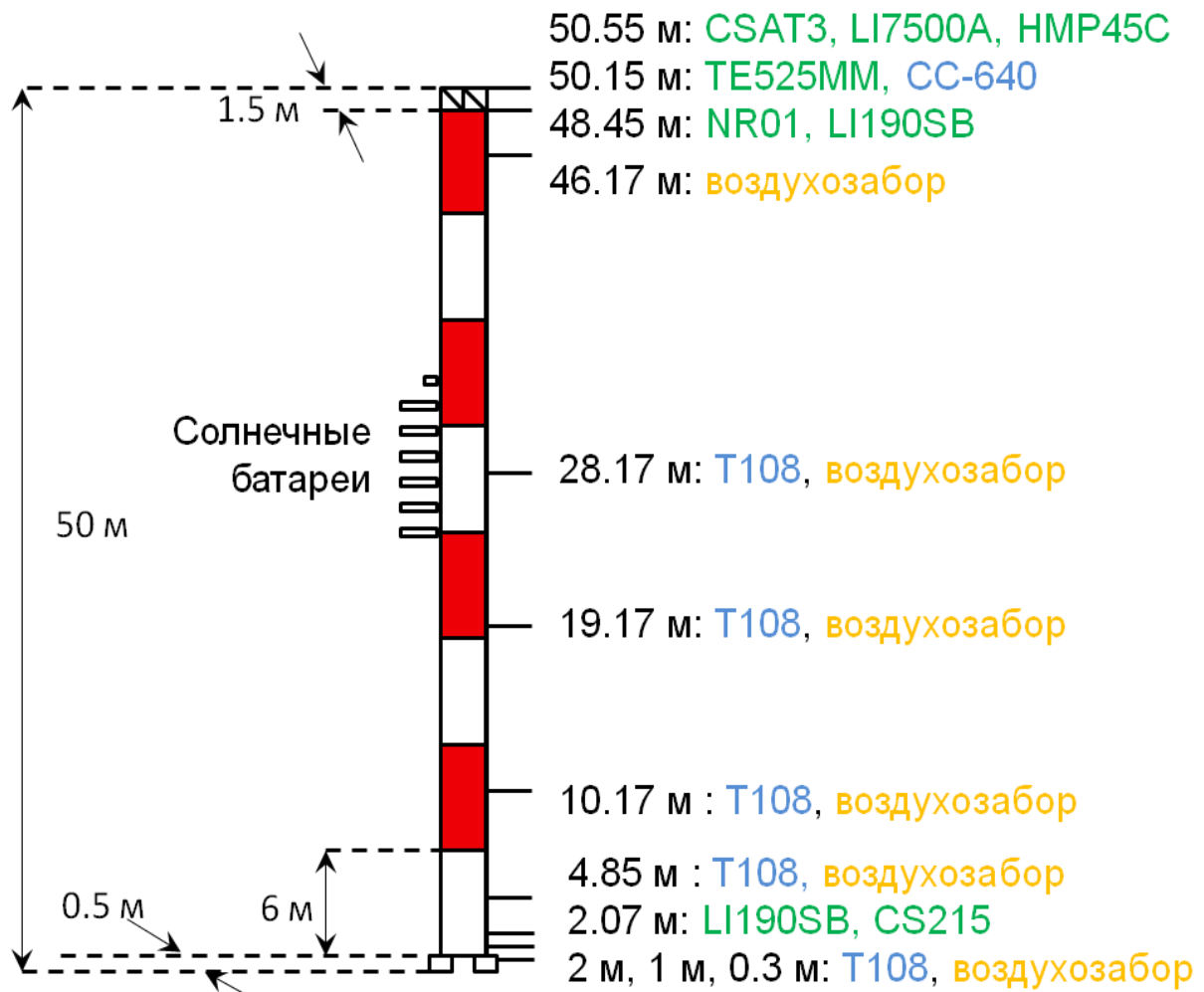


Рисунок 6 – Схема установки приборов на вышке



Рисунок 7 – Схема установки датчиков в почве

Все поправки метода, описанные выше, вводились в ходе **расчета потоков** из измеренных 10-Гц данных в программе EddyPro (Li-Cor Inc., USA). По итогам статистического анализа рассчитанным потокам присваивались флаги качества по 9-балльной системе (1 – наилучшее качество, 9 – плохое). Потоки с флагами 6-9 были исключены из рассмотрения; потоки с флагами 1-5 использовались для расчета годовых и месячных сумм; потоки с флагами 1-3 использовались для расчета регрессий потоков между собой и с метеорологическими параметрами. Точность оценки потока явного тепла с флагами 1-3 составляет 5 % или 10 Вт м^{-2} , а с флагами 4-6 – 10 % или 20 Вт м^{-2} . Для потока скрытого тепла аналогичные оценки точности составляют для флагов 1-3 10 % или 20 Вт м^{-2} , для флагов 4-6 – 15 % или 30 Вт м^{-2} . Для потока CO_2 оценки точности составляют для флагов 1-3 10 % или $4.5 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, для флагов 4-6 – 15 % или $6.75 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Помимо автоматических тестов использовался визуальный анализ качества данных и исключение небольшого количества дополнительных точек данных, так как

практика показала, что автоматические тесты не всегда отсекают физически невозможные и неадекватные значения (особенно в периоды непосредственно перед дождями и сразу после них). Запасы углекислого газа, тепла и влаги в столбе атмосферы ниже 50 м рассчитывались по профилям CO_2 , температуры и влажности. Для замыкания теплового баланса учитывались также изменения теплосодержания верхнего 8-см слоя почвы, т.к. датчики потока тепла в почву углублены на 8 сантиметров.

Этапы работы с пульсационными 30-мин данными по нетто-обмену углерода (*NEE*) экосистемы. После расчета 30-минутных значений в программе Eddy Pro следует несколько последовательных этапов работы с данными о нетто-обмене CO_2 : учет изменения запаса CO_2 в пологе леса; удаление потоков, полученных в условиях слабой турбулентности; удаление выбросов; заполнение пропусков (Таблица 2). Для расчетов регрессий от метеорологических переменных используются данные после этапов I-II; расчет месячных и годовых сумм осуществляется после этапов I-VI. Методика расчетов на первом и втором этапе общепринята, а третий и особенно четвертый этап могут быть осуществлены различными альтернативными путями. Этапы I-II описаны в данном разделе, а этап III и альтернативы на этапе IV рассмотрены в разделе 4.3 в связи с оценкой точности годовых оценок *NEE*.

Первый этап оценки годовых сумм *NEE* (Этап I Таблицы 2) состоял в ориентировочной оценке годовой суммы по исходным рядам, без нескольких последующих обязательных этапов работы с рядом *NEE*. Этап I включал заполнение исходного ряда на сайте Института Макса Планка (MPI), Германия (см. ниже) по методу потоков в аналогичных условиях (это стандартный метод) без II и III этапа (см. далее). Эта ориентировочная оценка годовой суммы проводилась исключительно в целях определения масштабов последующих поправок, иными словами, для оценки, насколько следующие этапы обработки повлияют на годовую сумму.

Таблица 2 – Этапы работы с пульсационными данными по нетто-обмену углерода (*NEE*) экосистемы с примером изменения годовых сумм по этапам расчета для данных по 2012 году

Этап		Изменение суммы <i>NEE</i> за 2012 г. относительно предыдущего пункта расчетов*, г С м ⁻² год ⁻¹	Итоговое значение <i>NEE</i> * за 2012 г., г С м ⁻² год ⁻¹
Этап I. Годовая сумма по исходным данным			-28
Этап II. Работа с незаполненными данными о <i>NEE</i> :			
1) учет накопления CO ₂ в пологе		-562	-590
2) отсев потоков в условиях слабой турбулентности		+210	-380
3) отсев выбросов	а) за 3σ	-135	-515
	б) автоматически-визуально	-22	-402
Этап III. Годовая сумма по среднему суточному ходу без заполнения пропусков			
Этап IV. Заполнение пропусков			

* Примечание 1. Сумма *NEE* за 2012 г. для этапов I и II была получена путем заполнения исходных рядов (без учета накопления CO₂ в пологе, с выбросами, с потоками в условиях слабого ветра) на сайте Института Макса Планка (MPI), Германия по методу потоков в аналогичных условиях

Второй этап оценки средних суточных и сезонных значений *NEE* (Этап II Таблицы 2) включает три процедуры, применяемые к ряду *NEE* с незаполненными пропусками:

- 1) учет накопления CO₂ в пологе;
- 2) удаление потоков, полученных в условиях слабой турбулентности;
- 3) удаление выбросов (значений, сильно выделяющихся из ряда в большую или меньшую сторону; английский эквивалент - spikes).

В том, что накопление CO₂ в пологе требуется включать в ряд нетто-обмена перед заполнением пропусков, у научного сообщества нет сомнений (Eddy..., 2012). Учет накопления CO₂ в пологе (Этап II, пункт 1 Таблицы 2) – это суммирование нетто-обмена углерода, измеренного пульсационным методом, и изменений запаса углекислого газа в пологе леса ниже уровня измерений, рассчитанных по измерениям профиля CO₂ в пологе леса.

Учет накопления CO₂ в пологе наиболее сильно повлиял на годовую сумму баланса углерода, – намного сильнее, чем исключение выбросов и использование

различных моделей заполнения пропусков. Это неожиданный результат, так как суммирование потока CO_2 по пульсационным измерениям и накопления CO_2 в пологе не должно влиять на годовую сумму NEE (а должно влиять только на суточный ход). После включения изменений запаса CO_2 нетто-обмен углерода снизился на $562 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, и NEE за 2012 г. составил $-380 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Мы полагаем, что столь сильное изменение годовой суммы NEE обусловлено резким снижением утренних значений потоков CO_2 после включения накопления CO_2 в пологе и, вследствие этого, значительным изменением регрессий, по которым происходило заполнение. Иными словами, при заполнении пропусков, если не учтено накопление CO_2 , образуется утренний пик нетто-обмена углерода вследствие выброса накопившегося за ночь CO_2 из полога леса. Этот утренний пик сильно влияет на коэффициенты регрессий при заполнении пропусков и, вследствие этого, на годовую сумму. В то время как включение небольших ночных значений накопления CO_2 в пологе повлияло не столь сильно. Таким образом, основной эффект достигался сглаживанием утреннего выброса CO_2 из полога леса при учете изменений запаса CO_2 в пологе.

Отсев потоков при низкой турбулентности (Этап II, пункт 2 Таблицы 2) – также конвенциональная поправка при работе с пульсационными измерениями.

Развитие турбулентности играет принципиальную роль в методе пульсационных наблюдений, т.к. при низкой турбулентности измерения потоков углекислого газа ненадежны (занижаются) и должны быть исключены из анализа. Значения, полученные в условиях слабо развитой турбулентности, заполняют при помощи регрессий потока CO_2 от метеопеременных в интервалы с достаточно развитой турбулентностью.

Общепринятым критерием слабой/развитой турбулентности служит критическое значение динамической скорости u^* (м с^{-1}), являющейся осредненной ковариацией горизонтальной и вертикальной скорости ветра:

$$u^* = -\sqrt{\overline{u'v'}} \quad (9)$$

Иными словами, динамическая скорость ветра рассчитывается как квадратный корень из среднего произведения пульсаций² ветра по оси x и по оси y , т.е. по двум горизонтальным перпендикулярным осям, направленным на север и восток.

Порог для данных по CO_2 в Кат Тьене был определен с помощью инструмента для определения порога турбулентности в пакете Flux-Analysis Tool (Ueyama et al., 2012). Для 2012 г. порог оказался равен $u^*=0.176 \text{ м с}^{-1}$, для 2013 г. – $u^*=0.158 \text{ м с}^{-1}$. Удаление NEE при слабом ветре, как правило, сильно смещает годовую сумму потока углерода в положительную сторону, т.е. от стока к источнику (Miller et al., 2004). Оценка чувствительности годовой суммы NEE в Кат Тьене была проведена за 2012 г. (Рисунок 8). При изменении порога турбулентности от 0 (любая скорость ветра) до 0.25 м с^{-1} годовая сумма NEE колебалась от -612 до $-340 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. В итоге, удаление NEE при $u^*<0.176 \text{ м с}^{-1}$ повысило исходную сумму NEE на $210 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

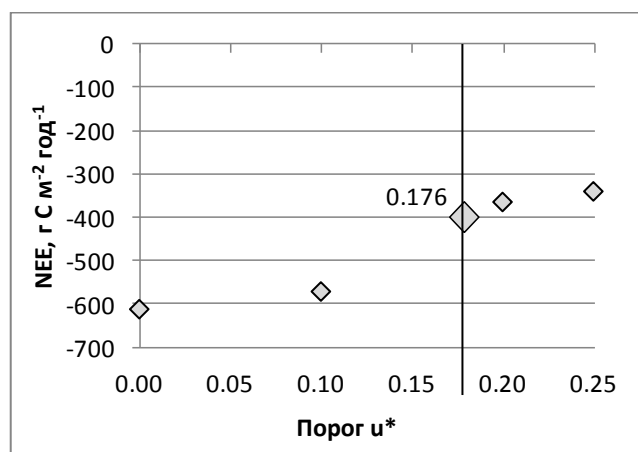


Рисунок 8 – Сумма нетто-обмена углерода экосистемы NEE в зависимости от порога динамической скорости ветра (u^*) за 2012 год

Ряд NEE с включенными изменениями запаса CO_2 в пологе и без потоков при слабой турбулентности подлежит следующей процедуре, относительно которой уже существуют некоторые разногласия – отсеиванию выбросов, т.е. выбивающихся из общего фона значений (Этап II, пункт 3 Таблицы 2).

² Пульсация - отклонение от среднего за определенный интервал осреднения; обозначается штрихом.

Количество значений, признанных выбросами и исключенных, зависит от критерия выброса. Данная процедура весьма актуальна, т.к. исходный ряд, до отсева выбросов, содержал значения, достигающие $-200...+140$ $\mu\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$ – несмотря на то, что были взяты только потоки с хорошим качеством согласно программе EddyPro и были исключены данные при слабой турбулентности. Полностью автоматизировать отсев выбросов рискованно (Дещеревский, Журавлев, 1997). Во-первых, и надежные значения (physical values) в определенных условиях могут значительно выделяться из среднего уровня данных (при этом часто именно они несут ценную информацию) и, во-вторых, наоборот, заведомо некачественные значения могут не отсеиваться автоматическими тестами программного обеспечения (такого как EddyPro). Для целей данной работы было произведено два варианта отсева выбросов:

1) автоматически-визуальным способом, путем отсева значений во время дождя и проверки всех выделяющихся значений;

2) исключены все значения, выходящие за рамки трех стандартных отклонений (для 2012 г. – меньше -50.3 и больше 33.1 $\mu\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$).

Ряд после этапов II-1 и II-2 давал годовую сумму *NEE* после заполнения -380 $\text{г С м}^{-2} \text{год}^{-1}$. После визуального отсеивания выбросов годовая сумма составила -402 ± 20 , а после отсеивания значений за 3σ -515 $\text{г С м}^{-2} \text{год}^{-1}$; таким образом, оба способа исключения выбросов сдвигали сумму в направлении к большему стоку углерода. Исходный ряд давал более высокую сумму за счет некоторых больших положительных ночных значений, влияющих на регрессии при заполнении пропусков.

Итого, годовая оценка нетто-обмена углерода (*NEE*) леса с атмосферой в Кат Тьене наиболее сильно зависела от (перечислены в порядке значимости):

- 1) учета накопления CO_2 в пологе;
- 2) алгоритма отсева выделяющихся значений – выбросов;
- 3) выбранного порога турбулентности.

При работе с *NEE* на этапах 2)-3) были использованы стандартные методы:

1) сочетание автоматического и визуального отсеивания выбросов, т.е. неправдоподобно (в данных условиях) больших значений;

2) отсев значений, полученных в условиях слабой турбулентности; порог турбулентности определен расчетным способом в программе Flux-Analysis Tool (Ueyama et al., 2012) и проверен визуально по принятой методике.

Количество и качество данных. В данной работе анализируются пульсационные и метеорологические данные за период 16.11.2011-26.05.2014 (случаи осреднения за иные периоды оговорены особо). Шаг расчета потоков и осреднения метеорологических данных составлял 30 минут. Таким образом, анализируемые базы данных собирались в течение 2.5 лет, и каждый ряд насчитывает 44300 измерений. Однако, несмотря на существование большого массива информации благодаря организации круглосуточных и частых измерений, в пульсационных данных обычен большой процент пропусков. Пропуски в данных о потоках обусловлены как естественными условиями-ограничениями метода (ливневые осадки, слабая турбулентность), так и техническими причинами (необходимость технического обслуживания и ремонта приборов и энергосистемы). Пропуски по техническим причинам длиной более 4 часов можно разделить на три группы:

1). Ремонт ультразвукового анемометра после повреждения пластиковых чехлов датчика, по-видимому, птицами (продолжался более 1.5 месяца);

2). Перебои энергоснабжения (два раза за 2011-2014 гг. по 1-2 недели);

3). Калибровки и замена химических реагентов инфракрасного газоанализатора (занимали 1-2 дня, раз в 2-3 месяца).

Небольшие пропуски (от 30 мин до нескольких часов) были вызваны сменой программ на накопителях. В сумме подобные пропуски составили не более 12 ч за 2011-2014 года.

Таким образом, пробелы в пульсационных данных по техническим причинам составили 13 % от всего времени наблюдений. От времени суток технические пробелы зависят слабо, если учитывать суммарную длину длительных сплошных пропусков.

В отличие от технических причин естественные причины пропусков – т.е. условия, в которых пульсационный метод дает данные низкого качества – имеют ярко выраженный суточный и сезонный ход, что обуславливает разницу в количестве ночных/дневных данных и данных за влажный/сухой сезон. Иными словами, выборка, по которой оцениваются те или иные свойства потоков, в определенные часы суток (ночью) и года (во влажный сезон) намного меньше. Основными естественными причинами пропусков в пульсационных данных являются дожди (для всех измеряемых потоков) и слабая турбулентность (для потока CO_2). Суточный и сезонный ход осадков и турбулентных характеристик атмосферы будет подробнее рассматриваться в разделе 3.1, однако здесь приводится краткая справка о частоте возникновения условий, препятствующих получению адекватных значений потоков. Одновременная фиксация метеорологических и пульсационных данных позволяет выявить условия, в которые данные о потоках искажаются, и исключить из рассмотрения эти данные.

30-минутных периодов с зафиксированными дождями (0.1 мм и более) за два полных года (2012 и 2013) было 2852 (8.1 %); во влажный сезон (1 апреля – 25 октября 2012 г., 21 апреля – 30 ноября 2013 г.) дожди выпадали в 1.5 раза чаще (13.1 % и 12.3 %, соответственно), а в пик влажного сезона (сентябрь 2012 г.) – и вовсе занимали четверть интервалов (25.2 %). Суточный ход осадков имеет пик около 16-20 ч вечера, в то время как темнота наступает около 18 ч; поэтому выраженных суточных различий в частоте дождей днем и ночью не наблюдалось. Так как часто искажаются значения потоков непосредственно до дождя и после него, пробелы в дождливых условиях занимают более значительную часть данных, чем непосредственно получасовые интервалы, в которые дождь выпадал. В данных за 2012-2013 гг. об испарении и о потоке CO_2 пробелы вследствие дождей составили 10 %. Во влажный сезон пробелы вследствие дождей составили уже 17-18 % в 2012 г. и 13-14 % в 2013 г., а в пик влажного сезона – 33 % данных по испарению и 29 % данных о потоке CO_2 .

Если принять во внимание исключение данных по всем упомянутым причинам, а также по статистическим тестам (на стационарность и т.п.), за 2012-

2013 гг. количество пропусков в потоке тепла составило 37 %, или 46 % ночью³ и 23 % днем (а оставшихся 30-мин значений, соответственно, 22200/10217/11983); в испарении 45 %, или 60 % ночью и 24 % днем (осталось 19407/7579/11829). Эти данные использовались для расчета месячных и годовых сумм. На месячные и годовые суммы ночные пропуски в потоках тепла и влаги не оказывают большого влияния, потому что ночные значения малы относительно дневных. Для потока CO_2 количество пропусков составило 42 %, или 51 % ночью и 28 % днем (осталось 20272/9171/11102), однако для расчета сумм обмена углерода, помимо уже упомянутых поправок, вводилась также поправка на слабую турбулентность.

50 % всех интервалов были признаны условиями с недостаточно развитой турбулентностью, в частности, 80 % ночных интервалов и 25-35 % дневных (более подробно сезонный и суточный ход u^* описан в разделе 3.1).

Таким образом, после исключения всех низкокачественных данных пропуски в потоке CO_2 за 2 полных года (2012-2013) составили 66 % случаев (87 % ночью и 37 % днем). Во влажный сезон 2012 г. количество пропусков составило 89 % ночью и 44 % днем; во влажный сезон 2013 г. – 88 % ночью и 42 % днем. Наиболее проблемным периодом являются ночи в пик влажного сезона: так, в сентябре 2012 г. доля исключенных данных в потоке CO_2 по ночам составила 94 %, и за месяц осталось всего 46 значений, распределенных следующим образом: 12 ночей, в которых есть 1-2 значения, и 7 ночей, в которых есть 3-7 значений. Большое количество ночных пропусков в потоке CO_2 представляет собой существенную проблему при суммировании до месячных и годовых сумм, т.к. потоки CO_2 ночью (дыхание экосистемы) велики относительно дневных потоков (фотосинтез + дыхания).

Для выявления регрессий потоков от метеорологических переменных применяются более строгие критерии отбора данных (пригодны только флаги качества 1-3 в программе EddyPro). Тогда для потока тепла количество пропусков составило 64 %, или 70 % ночью и 49 % днем (оставшихся 30-мин значений за два

³ Критерий выделения ночи – суммарная радиация меньше 20 Вт м^{-2} .

года 12640/5567/7073); для испарения количество пропусков 69 %, или 80 % ночью и 48 % днем (осталось 11019/3754/7265); в потоке CO_2 , с учетом поправки на слабую турбулентность, пропусков 77 %, или 90 % ночью и 54 % днем (осталось 8124/1932/6192). При этом в сентябре 2012 г. за весь месяц осталось только 28 значений.

Пробелы в данных о потоках тепла и влаги заполнялись с помощью онлайн-инструмента на сайте Института Макса Планка (MPI), Германия⁴. Использовались нелинейные регрессии потоков от метеорологических переменных (температуры воздуха в пологе, суммарной радиации, дефицита водяного пара) по классам аналогичных условий (Falge et al., 2001) с учетом ковариации потоков с метеопеременными и временной автокорреляции потоков по (Reichstein et al., 2005). Пробелы в данных о потоках CO_2 заполнялись несколькими различными способами (подробнее в разделе 4.3). Отдельное внимание было уделено поиску алгоритма заполнения пропусков, устойчивого к большому проценту пропусков в данных в ночные периоды влажного сезона.

На оценку сезонного хода потоков углерода очень сильно влияет алгоритм заполнения пропусков и наличие выбивающихся значений, что подтверждает, что контроль качества данных на всех этапах расчетов должен быть очень тщательным.

Для разделения нетто-обмена на первичную продукцию и экосистемное дыхание были использованы два алгоритма фракционирования потоков: по аппроксимации ночного дыхания на дневные периоды (Reichstein et al., 2005) и по световым кривым (Lasslop et al, 2010). Алгоритмы реализованы численно на сайте института Макса Планка в онлайн-инструменте для заполнения пропусков и разделения потоков. Метод разделения потоков по световым кривым (Lasslop et al, 2010) показал для условий Кат Тьена неустойчивые решения, сопровождавшиеся резкими всплесками дыхания экосистемы в некоторые периоды года. Для данной работы был выбран метод фракционирования потоков

⁴ <http://www.bgc-jena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/format.php>.

по аппроксимации ночного дыхания на дневные периоды (Reichstein et al., 2005) как более устойчивый. Однако, метод имеет существенный недостаток: так как днем к темновому дыханию листьев добавляется фотодыхание, дневное дыхание листьев при одних и тех же условиях больше ночного и определяется иными факторами. Фотодыхание может высвобождать до половины CO_2 , зафиксированного в процессе фотосинтеза (Чиков, 1996). Основными факторами, определяющими фотодыхание, являются интенсивность света и соотношение концентраций кислорода и углекислого газа (Чиков, 1996). Поэтому метод (Reichstein et al., 2005) подходит для аппроксимации только части суммарного дыхания экосистемы днем – дыхания почвы, валежа, стволов деревьев, темнового дыхания листьев. Полное дыхание экосистемы и фотосинтез, который получается в методе (Reichstein et al., 2005) как остаточный член, скорее всего, будут выше расчетных.

Благодаря сочетанию аналогичных метеорологических датчиков в двух независимых системах пробелов в метеорологических данных было немного. Дублирующиеся параметры (температура и влажность воздуха и почвы) в случае пробелов заполнялись с помощью данных другой системы. Наиболее длительным был пробел в метеорологических данных пульсационной системы 30.01.2012 - 13.02.2012. Пробелы в метеорологических данных, связанные с техническими работами, заполнялись с помощью нескольких методов в зависимости от размера пробела (и специфики конкретной переменной):

- 1). Пробелы до 4 часов включительно заполнялись линейной интерполяцией (скользящим средним в окне 450 мин).
- 2). Пробелы в несколько дней заполнялись средним суточным ходом в скользящем окне 10 дней.
- 3). Пробел в 2 недели в сухой сезон заполнялся с помощью аналогичных периодов (высыхание после дождя).

Радиационные характеристики заполнялись средним суточным ходом в скользящем окне 10 дней, процедура повторялась 2 раза. Заполненные таким

образом значения не использовались для корреляций с потоками, а использовались только для расчета месячных и годовых сумм.

Значения скорости и направления ветра в дождь были исключены, т.к. УЗ анемометр при попадании капель дождя в просвет между приемником и излучателем фиксирует неверные значения. Пробелы в значениях объемной влажности почвы в сухой сезон заполнялись с помощью уравнений высыхания. Проводился контроль качества метеорологических данных (тест на абсолютные значения, особенно важен для относительной влажности воздуха и температуры; значения коротковолновой радиации ночью заменялись на нули; к значениям фотосинтетически активной радиации, в том числе для лаиметра, вводилась поправка на постепенную деградацию прибора от солнца; и тому подобные).

Дополнительные измерения. В целях уточнения компонентов водного баланса проводились лизиметрические измерения и измерения количества влаги, прошедшей через полог леса после дождя.

Лизиметр представляет собой пластиковую емкость объемом 5-7 литров с прикрепленной сверху воронкой. Нижнее отверстие воронки закрыто подушечкой с песком для фильтрации взвеси. Емкость закопана в почву так, чтобы приемная воронка лизиметра находилась на глубине 50 см. Со дна емкости выведена на поверхность почвы пластиковая трубка, позволяющая выкачивать воду. Воду из лизиметров выкачивали насосом, затем пластиковым шприцом большого объема с периодичностью от 2 недель до 1 месяца в течение 2011-2013 годов. Лизиметр позволяет определить, сколько дождевой влаги просочилось через почву на глубину 50 см. Диаметр воронки лизиметра составлял 211 мм. Путем деления объема выкачанной влаги на площадь приемной воронки можно вычислить столб воды, просочившейся на глубину 50 см. Вторая характеристика, которую можно определить с помощью лизиметра, — срок, в который произошло повышение либо понижение уровня грунтовых вод относительно глубины 50 см. Если из лизиметра можно выкачать воды больше его объема, значит, в него свободно поступает вода извне, лизиметр «затоплен», уровень грунтовых вод выше 50 см. При снижении грунтовых вод ниже 50 см количество выкачиваемой

из лизиметра воды опять начинает быть меньше объема лизиметра. Всего в почву в районе измерительной вышки было установлено 5 лизиметров на расстоянии 20-50 метров друг от друга. В пяти разрезах, предназначенных для установки лизиметров, проводилось дополнительное исследование свойств почвы в различных горизонтах (механический состав, количество камней, плотность, влажность).

Помимо лизиметрических измерений, проводилось измерение осадков, дошедших до поверхности почвы под пологом леса после дождей. Осадки собирались с помощью цилиндрических емкостей, закрытых сверху воронками с сеточкой для предотвращения попадания в емкость упавших листьев, веточек, мелких животных и прочих материалов, снижающих точность измерений. Осадки измерялись через несколько часов после дождя (после прекращения капли с листьев) либо на следующий день, но не позже, так как попавшая в емкость влага днем испаряется. Было установлено сначала 20 емкостей через 5 метров по трансекте юго-восток – северо-запад, находящейся на западе от измерительной мачты; затем число емкостей было увеличено до 40. Через год измерений трансекта была перенесена на новое место, около 100 м на юго-запад от измерительной мачты, и уходила на юго-запад. Результаты измерений в 20 и 40 повторностях, а также на двух разных трансектах сравнивались. Диаметр приемной воронки составил 192 мм. Высота слоя осадков вычисляется аналогично высоте столба просочившейся влаги в лизиметре. С помощью данных измерений вычислялся перехват (осадки, испарившиеся в атмосферу с поверхности смоченных листьев, не дошедшие до земли).

Размер площади осреднения (футпринта), с которого собиралось 90 % потоков в Кат Тьене, в среднем составлял 674 м в наветренную сторону (362 м днем и 1722 м ночью). 50 % потоков собиралось с расстояния 175 м (131 м днем и 320 м ночью).

Выводы по главе. Таким образом, в работе рассматривается энерго- и массообмен сезонно-влажного тропического леса Кат Тьен (Южный Вьетнам), 11.4° с.ш., 107.4° в.д., абсолютная высота 130-150 м, на средне-богатых

темноцветных ферраллитных почвах, подстилаемых молодыми вулканическими базальтами. Климатические и почвенные условия – высокая годовая сумма осадков при сравнительно непродолжительном сухом сезоне, высокие влагоудерживающие способности грунта – позволяют развиваться многоярусному лесному сообществу (3-5 ярусов) с высоким биоразнообразием: фоновое количество видов деревьев составляет около 80. Лес частично листопаден: из верхних ярусов примерно половина древесных индивидов в пике сухого сезона сбрасывают листья на период от нескольких дней до нескольких месяцев. По структуре лес Кат Тьена более похож на постоянно-влажные экваториальные леса (например, леса Амазонии), чем на классические переменно-влажные листопадные леса.

Анализируемая база данных включала потоки тепла, влаги и углекислого газа, а также основные метеорологические параметры за три сухих и два влажных сезона (2.5 года измерений) с дискретностью 30 минут; количество анализируемых параметров – более 20; пространственное осреднение потоков в среднем осуществлялось на территории в радиусе 670 м от измерительного комплекса. База данных получена с помощью метода пульсационных наблюдений, широко применяющемуся по всему миру в сети долговременных наблюдений FLUXNET (более 550 станций в 2013 году). Достоинствами метода являются теоретическая проработанность, большой объем получаемой информации и ее осреднение по пространству, высокое разрешение, круглосуточность и всесезонность, применение стандартного оборудования и методик обработки информации. Основными ограничениями метода являются низкое качество потоков при сильных осадках и в условиях слабой турбулентности, вследствие чего в рядах данных значительна доля пропусков (около 40 % значений для потоков тепла и влаги и 65 % значений для потока CO_2). Наиболее велико количество пропусков в данных о потоке CO_2 в самые влажные месяцы в темное время суток (более 90 %). Поэтому при заполнении пропусков для подсчета месячных и годовых сумм обмена углерода большое внимание уделялось поиску алгоритмов, устойчивых к высокой доле пробелов в

данных. Благодаря наличию большого массива данных по потокам тепла и влаги, а также меньшей чувствительности качества этих потоков и их месячных и годовых сумм к атмосферным условиям, пропуски в потоках тепло- и влагообмена не являлись значительной проблемой. Помимо автоматических измерений, проводились дополнительные измерения отдельных компонентов водного баланса (осадки, дошедшие до земли; влага в почве).

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

3.1. Погодные условия

В диссертации рассматривается период наблюдений за потоками и метеорологическими условиями муссонного тропического леса с ноября 2011 года (начало работы измерительного комплекса) по май 2014 года. Таким образом, в работе дано описание трех сухих сезонов (зимы Северного полушария 2011-2012, 2012-2013 и 2013-2014 годов) и двух влажных сезонов (лето Северного полушария 2012 и 2013 года).

Сухие сезоны 2012-2013 и 2013-2014 годов были значительно засушливее и контрастнее по температуре, чем сухой сезон 2011-2012 гг., что дает материал для сравнения поведения лесной экосистемы в разнообразных метеорологических условиях. В данном разделе основное внимание уделяется температуре и влажности воздуха и почвы, ветровому режиму; радиационный режим полого будет подробно рассмотрен в разделе 3.2. Сравнение с погодными условиями на других пульсационных станциях Юго-Восточной Азии будет приведено при анализе динамики потоков радиации, тепла и влаги.

Общие замечания. Функционирование природной экосистемы на разных временных масштабах зависит от условий окружающей среды, важнейшими из которых являются метеорологические условия. Так, суммарное испарение экосистемы определяется соотношением количества доступной влаги и тепла, а также зависит от температуры и влажности воздуха (Иванов, 1948; Будыко, 1956; и др.). Продукция экосистемы зависит от количества и распределения фотосинтетически активной радиации; от доступности влаги в почве, температуры воздуха, дефицита водяного пара (Шульгин, 2009; Farquhar,

von Caemmerer, 1980; и другие). Дыхание экосистемы наиболее зависит от температуры (Lloyd, Taylor, 1994; Falge et al., 2002; Reichstein et al., 2005). Описание ветровых характеристик, турбулентности важны для данной работы, так как являются существенным ограничением измерений CO_2 пульсационным методом.

При анализе метеорологических условий отдельных лет важно представлять, насколько они отличаются от средних многолетних значений (нормы), т.е. климата исследуемой местности, что обусловило логику построения данной главы: кратко рассматриваются климатические условия района Кат Тьена, а затем погода в период измерений.

Климат Южного Вьетнама обычно характеризуют двумя сезонами (Nguyen Khanh Van et al., 2000), различающимися по режиму увлажнения: сухим сезоном (ноябрь-апрель) и влажным сезоном, или сезоном дождей (май-октябрь). По классификации Кеппена–Гейгера, основанной на учете режима температуры и осадков (McKnight, Hess, 2000), климат Южного Вьетнама относится к тропическому муссонному типу (tropical monsoon climate, Am); по отечественной классификации Б.П. Алисова (Хромов, Петросянц, 2001), климат Южного Вьетнама относится к субэкваториальному климату (климат экваториальных муссонов). Летний влажный муссон распространяется с юго-запада, Индийского океана, принося интенсивные дожди, а зимние сухие ветра дуют с северо-востока.

В сухой сезон активность растений и животных тропического муссонного леса существенно снижается, деревья верхних подъярусов сбрасывают листья; т.е. сухой сезон можно рассматривать как в целом менее благоприятный для экосистемы (лимитирующим фактором развития является увлажнение). При рассмотрении климата Южного Вьетнама годовыми различиями в температуре обычно пренебрегают, т.к. разница между средней температурой самого прохладного месяца, декабря (около $+24 \div +25$ °C), и самого жаркого месяца, апреля (около $+28$ °C) составляет всего около 3-4 °C. Однако тропический лес адаптирован к узкому диапазону температур (Ричардс, 1961); поэтому вероятно, что различия в несколько градусов могут играть существенную роль для

функционирования экосистемы. Поэтому далее при рассмотрении метеорологических условий акцент будет делаться на три наиболее характерных по погодным условиям периода: 1) прохладное начало сухого сезона (декабрь-январь), 2) жаркий и засушливый пик сухого сезона (март-апрель), 3) умеренный по температуре и наиболее дождливый период влажного сезона (август-сентябрь).

Для характеристики климатических условий южной равнинной части национального парка Кат Тьен была выбрана ближайшая к парку метеостанция Донг Соай (Đông Xoài), расположенная в 57 км на ЗСЗ от измерительного комплекса в Кат Тьене (Дещеревская и др., 2013). Абсолютная высота метеостанции составляет 150 м над уровнем моря. Для климатического анализа метеорологические данные были осреднены за 1981–2010 годы. Среднее годовое количество осадков составило 2518 мм год^{-1} , среднегодовая температура – 26.4°C . Самым прохладным месяцем в среднем является декабрь (средняя за месяц температура 24.7°C , ночная температура $+19 \div +21^\circ\text{C}$, дневная $+28 \div +30^\circ\text{C}$), а самым жарким – апрель (средняя за месяц температура 28.3°C , ночная температура $+21 \div +23^\circ\text{C}$, дневная $+32 \div +34^\circ\text{C}$). В течение сухого сезона температура растёт от минимальных значений за год до максимальных. Минимальная зафиксированная на метеостанции Донг Соай температура составила $+13^\circ\text{C}$ в декабре-январе, но в 2000-е гг. в связи с потеплением, отчетливо наблюдающимся в зимние месяцы, минимальная температура не опускалась ниже $+15 \div +16^\circ\text{C}$. В пике влажного сезона, в сентябре, дневная амплитуда температуры снижается: ночная температура составляет около $+24^\circ\text{C}$, дневная $+30^\circ\text{C}$.

Пик сухого сезона приходится на январь-февраль (8.2 и 15.5 мм осадков соответственно). «Климатологический сухой сезон» (см., например, Rodrigues et al., 2013), т.е. идущие последовательно месяцы, сумма осадков в каждый из которых не превышает 100 мм, включает четырехмесячный период с декабря по март. С точностью до дня можно вычислить границы сухого и влажного сезона по критериям, предложенным в (Дещеревская и др., 2013). Критерий начала влажного сезона – выпадение с начала марта за 5 дней в сумме ≥ 15 мм осадков и

отсутствие такой недели (до конца мая), в которую выпало < 2 мм осадков. Критерий конца влажного сезона – первый день пятидневки (начиная отсчет с 1 октября), в который одновременно выполняются два условия: 1) за 5 дней выпадет < 2 мм осадков; 2) после 5 дней с осадками < 2 мм в следующие две недели не случается дождя с интенсивностью ≥ 40 мм/5 дней. Тогда влажный сезон в окрестностях Кат Тьена наступает в среднем 23 апреля (22 марта–29 мая), оканчивается – 11 ноября (20 октября–20 декабря).

В период 1980-2010 гг. в исследуемом регионе не были зарегистрированы значимые перебои муссонных дождей, и в течение влажного сезона сухие периоды (пятидневки, в течение которых сумма осадков составила меньше 2 мм) только дважды за историю наблюдений превышали 10 дней. Условия сухого сезона же варьируют очень существенно – изменяется как продолжительность сухих периодов, так и засушливость сезона в целом. В 1980-2010 гг. сухие периоды имели продолжительность от 22 до 141 дня. Если для каждого сухого сезона определить максимальную продолжительность сухого периода и затем рассчитать среднее значение этого показателя за 30 лет, то получится длительность 55-66 дней (Дещеревская и др., 2013).

Максимальная продолжительность сухих периодов имела место в годы с крупномасштабным метеорологическим явлением Эль-Ниньо, которое оказывает значительное влияние на климат Юго-Восточной Азии (см. Cobb et al., 2003; McPhadden, 2002; Ninh et al., 2001; The impact..., 2000; Wang et al., 2000). В годы Эль-Ниньо количество осадков за период декабрь-март снижалось до 3.6 и 16.9 мм (1982-83 и 1997-98 гг.), в то время как 30-летняя норма за эти месяцы составляет 110.0 мм. Явление Эль-Ниньо статистически значимо повышает температуру сухого полугодия в среднем на 0.7°C , а в отдельные годы сильных Эль-Ниньо (1982–1983 и 1997–1998 гг.) увеличение среднемесячной температуры декабря-марта достигало $2-4^{\circ}\text{C}$ (Дещеревская и др., 2013). Самые жаркие месяцы года во второй половине сухого сезона становились еще жарче, а дневная температура приближалась к многолетнему максимуму ($+38.5^{\circ}\text{C}$). Явление Ла-Нинья (противоположная фаза Эль-Ниньо), напротив, вызывает более прохладные

и влажные зимы (умеренные изменения в пределах одного среднеквадратического отклонения).

Температурно-влажностный режим периода измерений (Таблица 1). Согласно критериям (Дещеревская и др., 2013, см. выше), переход к сухому сезону в 2011 г. состоялся около 12 ноября (расчет по метеорологическим наблюдениям Э. Галояна, личное сообщение) – т.е. практически одновременно с началом измерений, в 2012 г. – 25 октября, в 2013 г. – 30 ноября. Переход на влажный сезон в 2012 г. произошел 1 апреля после ливней тропического циклона Паркхар (Parkhar), составивших за двое суток 123.7 мм, в 2013 г. – 21 апреля, в 2014 г. – 29 марта. Таким образом, анализируемый период включает 3 сухих сезона и 2 влажных сезона. В сухой сезон 2011-2012 гг. непромывной режим почв сохранялся до 1 апреля, в сухой сезон 2012-2013 гг. – до 18 апреля, в 2013-2014 гг. – до 11 апреля.

Сумма осадков с 15 ноября 2011 г. по 15 марта 2012 г. составила 143.4 мм (30-летняя норма – 126.2 мм); за аналогичный период во второй сухой сезон сумма осадков составила всего 14.4 мм, в третий сухой сезон с 1 декабря по 29 марта выпало 12.2 миллиметра. Таким образом, сухой сезон 2011-2012 гг. оказался на 3 недели короче нормы и более влажным, а сухие сезоны 2012-2013 и 2013-2014 гг., напротив, были на 2.5 недели длиннее и значительно засушливее нормы (см. Таблицу 1 и Рисунок 1, а).

В сухие сезоны 2012-2013 и 2013-2014 гг. меньшее количество облаков вызвало большую амплитуду температуры в суточном и сезонном ходе. Так, в 2013 и 2014 гг. ночи в декабре-январе были более холодными, чем в 2012 году. Температура в пологе леса 16 и 19 января 2013 г. снижалась до 15.5 и 14.6 °С, соответственно; в почве на 5 см глубины – 20.4 °С; 23 и 25 января 2014 г. в пологе леса был зафиксирован минимум температуры за все время измерений: 13.9 и 14.3 °С, соответственно, в почве – 18.3 и 18.4 °С, соответственно.

Таблица 1 – Метеорологические условия анализируемого периода
(ноябрь 2011 г. – май 2014 г.)

Параметр	Ta 50м	Ta 30м	Ta 2м	Pr	Rh 50м	P	WS	Rs	Ts 5см	Ts 50см	SWC 5см	SWC 50см
Единицы измерения	°C	°C	°C	мм мес ⁻¹	%	кПа	м с ⁻¹	МДж м ⁻²	°C	°C	% об.	% об.
11-2011	25.6	25.5	24.6	19.5	81.1	98.7	1.8	629.8	25.3	25.7	32	32
12-2011	24.0	23.9	22.8	49.8	76.7	98.8	2.2	509.8	23.7	24.9	25	29
01-2012	24.7	24.8	23.6	32.7	77.1	98.8	1.8	517.8	24.1	24.7	23	29
02-2012	25.6	25.9	24.9	37.9	73.5	98.7	1.8	551.4	25.2	25.2	21	28
03-2012	26.7	26.9	26.2	24.1	69.4	98.7	1.8	653.0	26.3	25.9	15	25
04-2012	26.4	26.7	26.1	286.7	80.7	98.7	1.7	653.5	26.5	26.1	25	30
05-2012	26.6	26.9	26.2	128.8	84.3	98.5	1.6	593.5	26.9	26.8	25	29
06-2012	25.5	25.9	25.2	327.7	89.8	98.5	1.7	460.2	26.4	26.5	29	31
07-2012	25.3	25.6	25.2	528.3	90.0	98.5	1.7	527.9	25.9	26.0	32	36
08-2012	25.8	26.2	25.6	266.6	87.4	98.6	1.6	540.1	26.0	26.0	32	34
09-2012	24.5	25.0	24.8	670.6	93.8	98.6	1.4	425.2	25.2	25.5	38	42
10-2012	25.3	25.7	24.9	267.4	86.2	98.7	1.5	602.1	25.0	25.3	34	37
11-2012	25.5	25.8	24.8	46.8	85.1	98.7	1.6	561.0	25.0	25.5	28	31
12-2012	25.5	25.6	24.0	3.0	75.7	98.8	1.9	583.4	24.3	25.1	16	26
01-2013	24.7	24.8	23.3	2.9	68.6	98.9	2.0	572.1	23.2	24.4	14	21
02-2013	26.7	26.7	25.5	4.9	59.6	98.8	1.7	582.6	24.4	24.6	12	18
03-2013	27.1	27.2	26.8	75.2	67.6	98.8	1.8	647.2	26.1	25.6	13	17
04-2013	27.5	27.5	26.6	103.7	76.4	98.6	1.7	608.1	26.6	26.5	21	23
05-2013	27.2	27.2	26.3	142.6	82.0	98.59	1.7	602.3	26.6	26.6	21	26
06-2013	26.1	26.2	25.4	381.1	88.4	98.6	1.5	513.8	26.0	26.3	26	30
07-2013	25.2	25.6	25.0	491.9	89.4	98.4	1.4	493.5	25.6	26.0	27	34
08-2013	25.0	25.4	24.7	488.1	88.5	98.5	1.4	488.1	25.3	25.5	34	41
09-2013	24.6	25.0	24.5	374.9	90.9	98.5	1.6	443.6	25.1	25.5	31	34
10-2013	25.1	25.5	24.6	356.2	87.1	98.6	1.5	567.8	25.0	25.3	31	35
11-2013	24.9	25.2	24.1	201.1	83.9	98.7	1.5	512.1	24.6	25.1	28	32
12-2013	23.6	23.7	22.4	11.7	77.9	98.7	1.7	510.9	23.2	24.4	19	28
01-2014	23.0	23.0	21.4	0.3	69.1	98.8	1.9	576.4	21.8	23.3	14	21
02-2014	24.4	24.5	23.4	0.2	71.2	99.0	2.1	637.1	22.8	23.3	12	18
03-2014	26.9	26.9	26.5	15.9	66.5	98.8	1.8	661.7	25.2	24.6	11	17
04-2014	26.6	26.7	26.1	200.0	82.3	98.8	1.9	643.0	26.2	26.0	21	22
05-2014	27.5	27.5	26.6	217.0	83.4	98.7	1.6	695.9	26.7	26.5	24	30
2012	25.6	25.9	25.1	2621	82.7	98.7	1.7	6669	25.6	25.7	27	32
2013	25.6	25.8	25.0	2634	80.0	98.7	1.6	6542	25.5	25.2	23	28

Примечания. Ta 50м, Ta 30м и Ta 2м – температура воздуха на высоте 50, 30 и 2 м, Pr – осадки, Rh 50м – относительная влажность на высоте 50м, P – давление, WS – скорость ветра, Rs – суммарная радиация, Ts 5см и Ts 50см – температура почвы на глубине 5 и 50 см, SWC 5см и SWC 50см – влажность почвы на глубине 5 и 50 см в процентах по объему. Указаны величины для второй половины ноября 2011 года

Дни во второй половине сухого сезона в 2013 и 2014 гг. были более жаркими, чем в 2012 году. 2 и 23 марта, 6 апреля 2013 г. температура в пологе леса достигала $+36.9 \div +37.5$ °C, в верхнем слое почвы – $+27.9 \div +28.8$ °C; 12 и 15 марта 2014 г. в пологе леса температура поднималась до $+36.1 \div +36.6$ °C, в почве – до $+27.1 \div +27.3$ °C.

Скорее всего, более влажная и более прохладная зима 2011-2012 г. была обусловлена фазой Ла-Нинья явления Эль-Ниньо-Южное колебание. Фаза Ла-Нинья приносит более прохладные и влажные зимы в Юго-Восточную Азию. В течение сухого сезона 2012-2013 и 2013-2014 гг. индекс Эль-Ниньо колебался около нуля (фаза не выражена).

В целом, сухие сезоны 2012-2013, 2013-2014 гг. оказались засушливее и жарче сухого сезона 2011-2012 годов. Однако как продолжительность сухих сезонов, так и отклонения температуры и осадков не были исключительными, как, например, в годы сильного Эль-Ниньо 1982-1983.

Влажные сезоны 2012 и 2013 гг. были несколько более влажными, чем средний за 30 лет на метеостанции Донг Соай (2476.1 и 2487.8 мм соответственно вместо 2265.1 мм). Разброс месячных сумм осадков находился в пределах двух среднеквадратичных отклонений от климатической нормы. Самым влажным месяцем оказался сентябрь 2012, в который выпало 670.6 мм – 1.5 сентябрьской нормы осадков (и без того максимальной в годовом ходе).

Влажность самого верхнего слоя почвы (0-5 см) – важный показатель для определения горючести леса и возможности лесных пожаров. Объемная влажность почвы на глубине 5 см в марте 2013 и марте 2014 гг. снижалась до рекордно низких значений – 11 % по объему (Рисунок 1, а). Тем не менее, т.к. влажность завядания для суглинистой почвы составляет 9-10 % (Руднев, 2003), даже в достаточно сухие годы на измерительной станции влажность приблизилась к этой отметке всего на 1-3 недели. В сухой сезон 2012-2013 гг. кривая иссушения верхних 5 см слоя почвы по дням (Рисунок 1, в) могла быть аппроксимирована ($r^2=0.98$) уравнением

$$SWC = -0.04\ln(N) + 0.2944, \quad (1)$$

где N – номер дня от начала периода без дождей.

Это означает, что если бы в 2012-2013 гг. период без дождей продлился на неделю больше, влажность бы опустилась ниже 10 %. Очень похожая ситуация наблюдалась и в 2013-2014 годах.

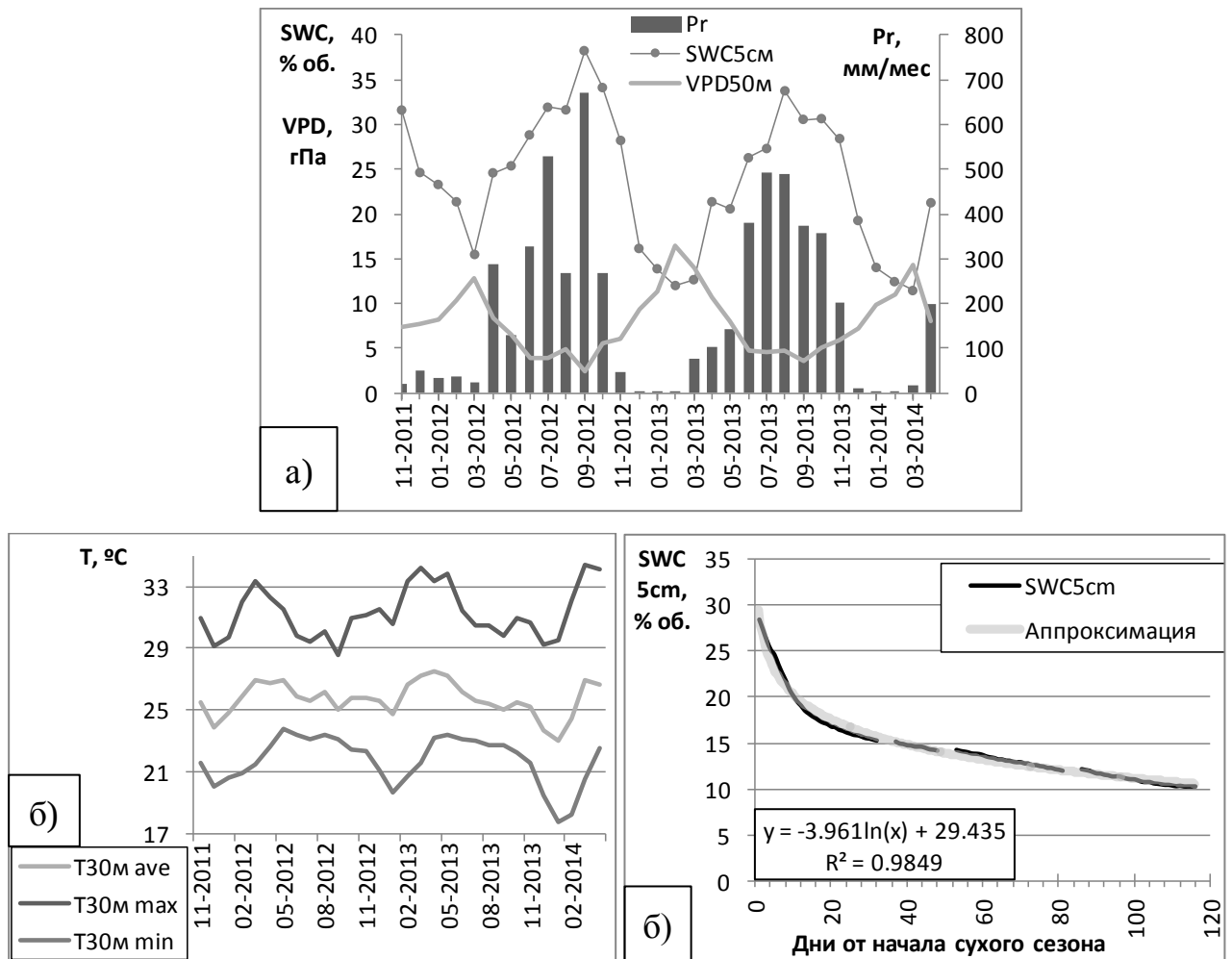


Рисунок 1 – Метеорологические условия за период 11/2011-05/2014 гг.:

- а) Объемная влажность почвы на глубине 5 см ($SWC5cm$), дефицит водяного пара над пологом леса, на высоте 50 м ($VPD50m$), месячная сумма осадков (Pr);
- б) Средняя за месяц ($T30m\ ave$), средняя минимальная ($T30m\ min$) и средняя максимальная температура ($T30m\ max$) за сутки в пологе леса, на высоте 30 м;
- в) Влажность верхних 5 см почвы ($SWC5cm$) за сухой период, в который не было дождей больше 2 мм, в 2012-2013 гг., и аппроксимация $SWC5cm$ от продолжительности периода. Разрывы в линии $SWC5cm$ – исключенные из анализа дни небольших дождей и период 2-3 дня после них

В общем, если длина сухого периода (в который выпадает менее 4-5 мм мес⁻¹) составляет в Кат Тьене более 120-130 дней (несколько более 4-х месяцев), то к концу периода влажность верхнего слоя почвы окажется равной влажности завядания. Продолжительность более 130 дней, согласно климатическим данным за 1980-2010, наблюдалась редко. По метеостанции Донг Соай, такая продолжительность была зафиксирована только в 1982-1983, 1986-1987 годах. Сухие сезоны 1991-1992, 1997-1998, 2003-2004 были почти столь же длинными, но черту в 130 дней не пересекли. Все эти годы были годами явления Эль-Ниньо (2003-2004 – слабое явление, остальные годы – сильные явления).

Объемная влажность почвы на 50 см глубины падала до 16 % в пике сухого сезона, что немногим выше влажности верхних слоев почвы.

В марте-апреле 2013 и 2014 гг. средняя за сутки температура почвы на 5 см достигала максимальных значений 27...28 °С. В феврале 2013 г. среднемесячный дефицит водяного пара увеличивался до 16.5 гПа (Рисунок 1, б), что соответствовало 60%-ной среднемесячной относительной влажности воздуха над пологом леса. Условия атмосферной засухи при $Rh < 30\%$ (Руднев, 2003), в течение нескольких часов подряд (13-17 ч.) были зафиксированы в 2012 г. 5 раз с января по март, в 2013 г. 19 раз в январе-апреле, в 2014 г. 9 раз в феврале-марте. Февраль-март 2013 г. оказались самыми сухими месяцами за 2011-2014 гг.; среднесуточная относительная влажность достигала 49-50 %, а рекордные 30-минутные значения падали до 18-20 % (18 февраля 2013 г.), что соответствует дефициту водяного пара – при наблюдавшейся температуре 32...34 °С – в 42-44 гПа.

Напротив, в самый влажный месяц – сентябрь 2012 г. – среднемесячная относительная влажность составила 94 %. В сентябре выделяются два дня (13 и 28 сентября 2012 г.), в которые почти непрерывно шел дождь, и поэтому даже среднесуточная относительная влажность над лесом оставалась близка к 100 %, хотя в ясные дни сентября минимальные 30-мин значения относительной влажности в послеполуденные часы опускались до 53-55 %.

Амплитуда колебаний среднемесячной температуры почвы на глубине 5 см составила 4.8 °C; на глубине 50 см амплитуда снизилась в 1.5 раза. В сезон дождей с установлением промывного и тем более застойного режима увлажнения почва постепенно отдавала тепло, накопленное за самую жаркую часть года; температура почвы во всем почвенном профиле выравнивалась и снижалась от мая к октябрю с 26.7 °C до 25.1 °C.

Радиационный режим. Согласно Таблице 1, в среднем за 30 лет (климат) на метеостанции Фьюк Лонг в сентябре количество часов солнечного сияния составляет 55 % от января. При этом в пик влажного сезона солнечное сияние составляет 40-41 % от максимально возможного, в январе-феврале - 77 %, а в марте-апреле – 65 % и 57 %. Количество часов солнечного сияния (в т.ч. как параметр, позволяющий оценить облачность) не входит в измеряемые параметры на станции пульсационных наблюдений; измеряется суммарная радиация, или приходящее коротковолновое излучение в диапазоне 0.3-4 мкм.

Для измерительной станции в Кат Тьене отношение наименьшей месячной суммы солнечной радиации (за 09.2012) к наибольшей (за 04.2012) составило 0.65. В отличие от соотношения по продолжительности солнечного сияния, этот критерий учитывает интенсивность («качество», а не только продолжительность) солнечной радиации. Поэтому максимальная месячная сумма, как и максимальные дневные суммы, была зафиксирована не в январе, а в апреле (см. Рисунок 4 в разделе 3.2): солнце находилось близко к зениту, а облачность была еще не столь значительна, как в дождливый сезон (подробнее в разделе 3.2).

Косвенную оценку влияния облачности на приход солнечной радиации можно сделать с помощью сравнения дневных сумм радиации: реальных с максимальными за данный месяц. Максимальные дневные суммы суммарной радиации достигались при ясном небе либо при небольшой облачности (1-2 балла из 10). В любом месяце, даже в пик влажного сезона, можно найти почти ясный день, сумма радиации в который приближается к максимально возможной. Однако, эта оценка влияния облачности приближительна: подвержена искажению

вследствие изменений запыленности воздуха и концентраций малых газовых составляющих, способных задерживать солнечную радиацию.

Месяцами с самым низким отношением средняя/максимальная сумма радиации были сентябри 2012 и 2013 гг., отношение составило 0.61 и 0.57. Наибольшее отношение зафиксировано для декабря 2012 г. и января-марта 2013 г. – 0.86-0.87. В целом, в сухом сезоне отношение средняя/максимальная сумма солнечной радиации составляет около 0.8, во влажном – около 0.7. Более подробно ход облачности рассмотрен в разделе 3.2.

Ветровой режим. Преобладавшие ветра отражали муссонную циркуляцию воздушных потоков со сменой направления ветра в переходные сезоны, северными ветрами зимой и юго-западными – летом (Рисунок 2, а). Стоит отметить большую устойчивость направления ветра в зимние месяцы, чем в летние: в декабре 2011 г. и январе 2012 г. ветра северной четверти (азимут от 315 до 45 °) были зафиксированы в 82 и 72 % всех 30-мин интервалов соответственно, а в августе-сентябре 2012 г. ветра юго-западной четверти составляли только 40 % и 22 %. Зимний сухой муссон в Кат Тьене дул с севера и даже северо-запада, хотя в целом для Южного Вьетнама характерен северо-восточный зимний муссон. По-видимому, на зимнем направлении ветра сказываются местные циркуляции, обусловленные рельефом. Максимальная восточная компонента отмечалась в мае (19-21 %), но и в первой половине сухого сезона повторяемость ветров восточной четверти составляла 16 %. Подобные оценки интересны для более точного определения области, с которой собираются измеряемые потоки.

Среднемесячная скорость ветра в течение всего года была невелика (Рисунок 2, б). Максимальная скорость ветра наблюдалась в зимние месяцы с наибольшей повторяемостью северных ветров и минимальной температурой за сухой сезон: 2.0-2.2 м с⁻¹ в декабре 2011 г., январе 2013 и январе 2014 года. Минимальная скорость ветра (1.4 м с⁻¹) была характерна для самых влажных месяцев – сентября 2012 г., июня-июля 2013 года.

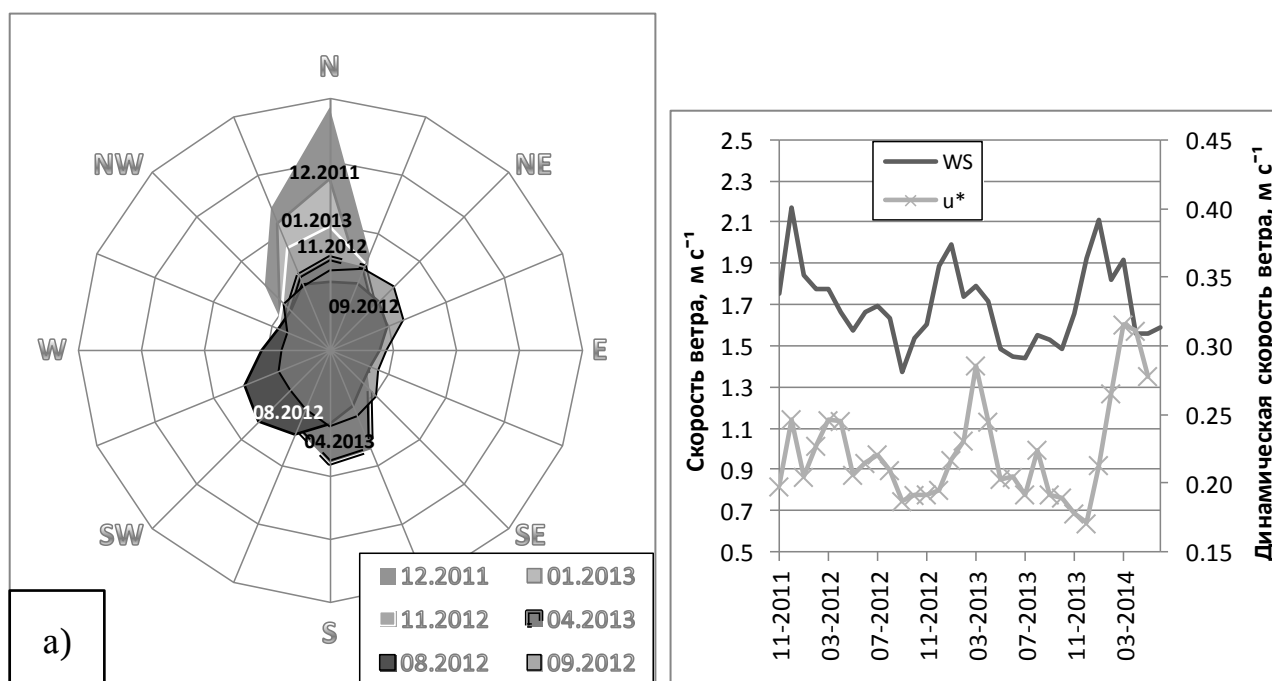


Рисунок 2 – Характеристики ветрового режима:

а) Роза ветров для характерных периодов: пика дождливого сезона (08.2012 и 09.2012), переходных сезонов (11.2012 и 04.2013) и наибольшей повторяемости северного муссона (12.2011 и 01.2013);

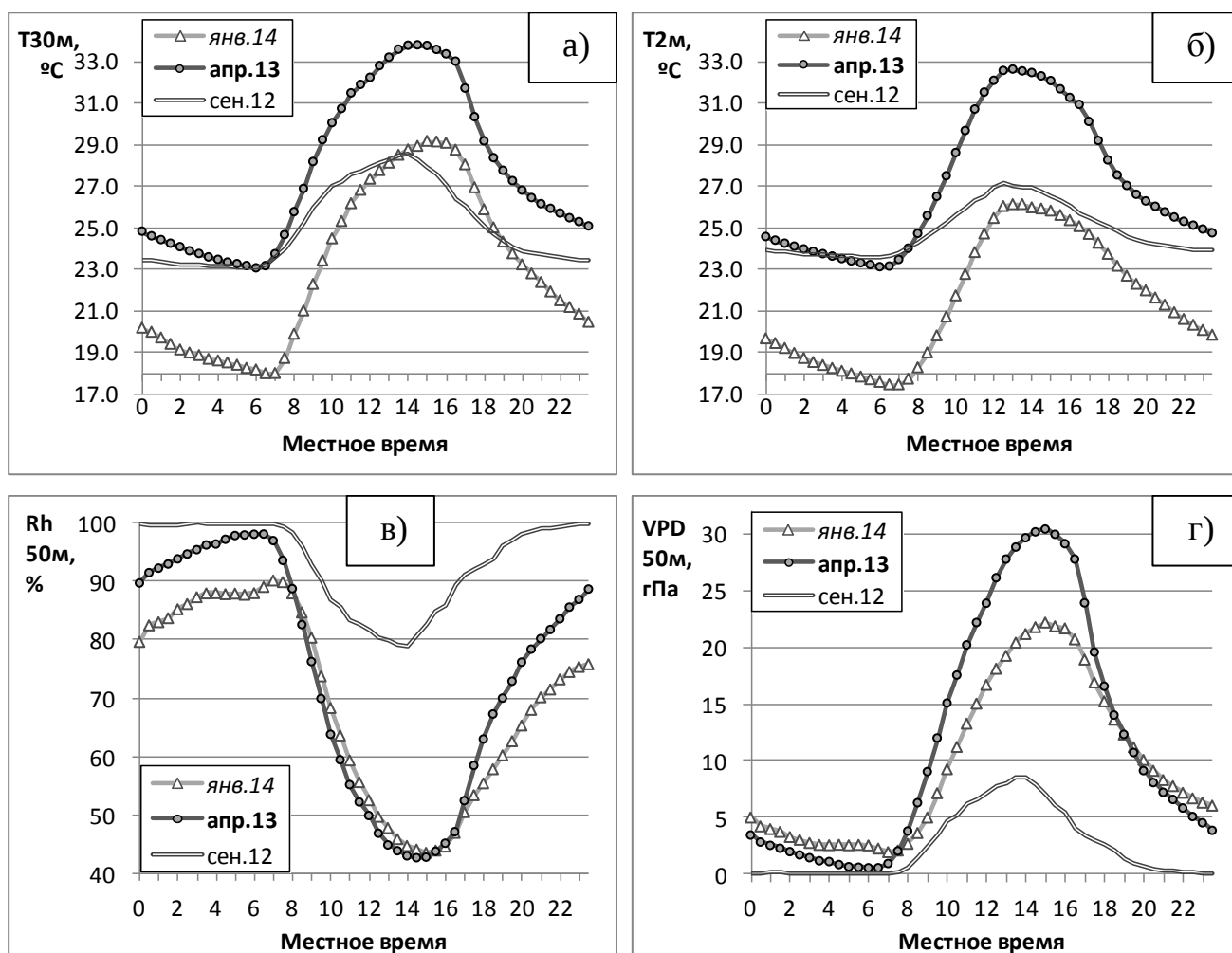
б) Скорость ветра (WS) и динамическая скорость ветра (u^*)

Динамическая скорость ветра u^* является важнейшей характеристикой турбулентного режима атмосферы (физический смысл и формула расчета, а также значение этой характеристики для метода пульсационных наблюдений приведены в разделе 2.2). В период наблюдений среднемесячная величина динамической скорости ветра u^* колебалась от 0.17-0.18 m s^{-1} в ноябре-декабре 2013 г. (начало сухого сезона) и сентябре 2012 г. (пик влажного сезона) до 0.24...0.28 m s^{-1} в марте-мае 2012, 2013 и 2014 годов. В целом, динамическая скорость ветра была низкой в очень влажные месяцы и в начале сухого сезона, а с увеличением количества солнечной радиации и прогрева земной поверхности значительно повышалась.

Суточный ход основных метеорологических параметров в разные периоды года. Для экологических исследований важны не только средние сезонные условия, но и особенности суточного хода метеорологических характеристик, в том числе такие параметры как средний послеполуденный

максимум температуры и минимум влажности (может обуславливать полуденную депрессию фотосинтеза), ночная температура (играет важную роль в суммарном дыхании экосистемы), продолжительность светлого времени суток и другие.

Суточный ход основных метеорологических параметров – температуры, влажности, радиации – наиболее ярко выражен во второй половине сухого сезона, т.е. в самое жаркое время года (март-апрель); напротив, повышение облачности в сезон дождей сглаживает дневные и ночные контрасты (Рисунок 3). На Рисунке 3 показаны месяцы, ход метеопараметров в которые наиболее выразительно характеризует прохладную и сухую первую половину сухого сезона (январь 2013 или 2014 г.), жаркую и засушливую вторую половину сухого сезона (март 2012 или апрель 2013 г.), пик влажного сезона (сентябрь 2012 года).



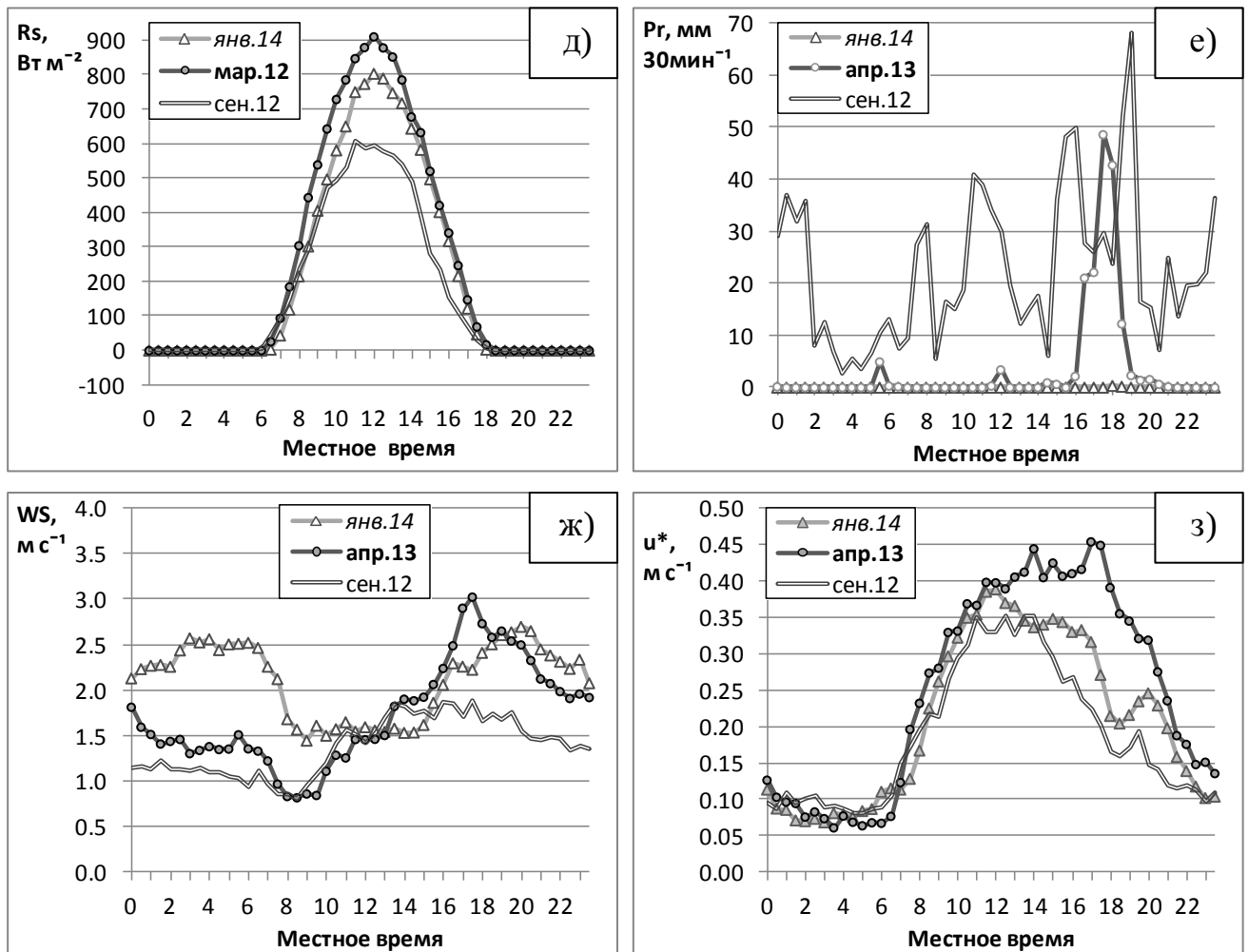


Рисунок 3 – Суточный ход метеорологических параметров в периоды года с характерными условиями: первая половина сухого сезона (янв.14 или янв.13), вторая половина сухого сезона (мар.12 или апр.13), пик влажного сезона (сен.12):
 а) Температура в пологе леса на высоте 30 м (T_{30m});
 б) Температура под пологом леса на высоте 2 м (T_{2m});
 в) Относительная влажность над пологом леса на высоте 50 м (Rh_{50m});
 г) Дефицит водяного пара над пологом леса на высоте 50 м (VPD_{50m});
 д) Суммарная радиация над пологом леса (R_s);
 е) Осадки (Pr);
 ж) Скорость ветра над пологом леса (WS);
 з) Динамическая скорость ветра (u^*)

В первой половине сухого сезона и во влажный сезон температура днем на высоте 2 м, под пологом леса, на 1-2 градуса ниже, чем в пологе (Рисунок 3, а, б). Интересно, что минимум (в декабре-январе) и максимум (в марте-апреле) температуры практически одинаков на всех высотах в лесу от земли до 50 м. В декабре-январе холодный тяжелый воздух опускается вниз, обеспечивая

охлаждение воздуха до земли, поэтому и температура почвы в январе опускается до относительно низких значений. В марте-апреле же солнце стоит почти в зените, и отвесные солнечные лучи проникают до почвы в лесных окнах, нагревая почву и от нее – воздух под пологом.

Минимум температуры в суточном ходе наступает в 6:00-6:30 (позже в декабре), максимум же довольно широко варьирует (от 13:30 до 16:30). Время начала подъема температуры утром в пологе леса (30 м) и под пологом (2 м) различается менее, чем на 30 мин. Иными словами, утром нет существенного запаздывания по фазе T_{2м} относительно T_{30м}. Температура в пологе в среднем достигает максимума около 14:00-14:30. На 2 м – раньше: в 12:30-13:00. Вероятно, это связано с тем, что в 12:30-13:00 солнечные лучи проникают под полог почти вертикально, и, как следствие, доходят до поверхности почвы.

Для Южного Вьетнама характерна относительно большая суточная амплитуда температуры, причем суточная амплитуда больше сезонной, что в принципе характерно для тропического и континентального экваториального климата. Так, в январе 2012 г. было +30 °С днем, +19 °С утром. Наибольшая амплитуда температуры в среднем суточном ходе была характерна для марта 2012 г. – от 21.5 °С ранним утром до 33.4 °С после полудня.

Суточная амплитуда влажности воздуха, кроме пика влажного сезона, также достаточно велика: в январе относительная влажность днем составляла 30-40 %, ночью – 100 %. В 1-й половине сухого сезона отмечались утренние туманы. В марте 2012 г. наблюдалась наибольшая амплитуда относительной влажности – от 95 % ранним утром до 38 % в послеполуденные часы, что было связано с наибольшей амплитудой и температуры. Во влажный сезон ночью относительная влажность почти всегда поднималась до 100 %.

Различия в длине светового дня в течение года незначительны (1 ч 20 мин). Как это характерно для тропической зоны, возрастание и снижение интенсивности радиации происходит очень быстро, период сумерек краток (Рисунок 3, д). Максимальная радиация в середине дня, если взять среднюю величину за месяц, в первой половине сухого сезона достигает 770-780 Вт м⁻², во

второй половине сухого сезона – $820\text{--}910 \text{ Вт м}^{-2}$, в пик влажного сезона же – всего 600 Вт м^{-2} , в 1.5 раза меньше, чем в марте-апреле.

Интересная особенность режима осадков Кат Тьена (и муссонного типа климата в общем – см. Ohsawa et al., 2001; Kikuchi, Wang, 2008) – яркий суточный ход: с 16:30 до 20:30 выпадает около половины дневной суммы (Рисунок 3, е). Иными словами, ливневые дожди чаще всего идут вечером. Наиболее выражен суточный ход осадков в сухой и переходные периоды года, но тренд остается заметным даже в пик влажного сезона.

Средний суточный ход влажности верхнего 5-см слоя (на Рисунке 3 не показана) составляет меньше 1 % по объему в сухой сезон и едва достигает 2 %об. во влажный сезон. Объемная влажность почвы в сильные ливни увеличивается на 10-20 %. В сухой сезон осадки менее 2-3 мм в день не изменяют влажность верхнего слоя почвы – повышается только влажность опада, а основная часть осадков испаряется еще с листьев, не достигнув поверхности земли. Осадки величиной порядка 20 мм за сутки повышают влажность почвы на 10 %об.; требуется около двух недель, чтобы влажность почвы вернулась к уровню до дождя. В общем, суточный ход влажности почвы незначителен по сравнению с колебаниями во время ливней и с сезонным ходом.

Суточный ход температуры верхнего 5-см слоя почвы составляет от 24.8 до 27.8 °C в апреле; от 22.7 до 25.0 °C в декабре; от 24.7 до 25.6 °C в сентябре. Температура почвы может резко снижаться после ливневых дождей. Сильнее всего это проявляется во второй половине сухого сезона, когда почва наиболее прогрета: 26 апреля 2012 г. зафиксирован случай снижения за час температуры верхнего слоя почвы с 28.6 до 24.3 °C. Во влажный сезон температура почвы в дождь обычно снижается на 1-2 °C. Ночами 23-25 января 2013 г. температура почвы на глубине 5 см снижалась до рекордных $18.3\text{--}18.4$ °C, но это было связано не с дождями, а с вторжением холодной воздушной массы с северо-запада.

Выводы по главе. Южный Вьетнам характеризуется субэкваториальным климатом (по классификации Алисова), или тропическим муссонным климатом Am (по классификации Кёппена-Гейгера). В данном климате существует два

сезона – сезон дождей (с апреля по октябрь) и сухой сезон (с ноября по март). Наиболее четко проявляются различия в количестве осадков между сезонами: так, в июле и сентябре 2012 г. выпало 528.3 и 670.6 мм осадков, а в январе и феврале 2014 г. – 0.3 и 0.2 мм.

В течение 2012 года амплитуда средней месячной температуры в пологе леса составила всего 2.2 °С, в течение 2014 г. – 4.5 °С. Самые прохладные месяцы – декабри 2011 и 2013 гг., январь 2011-2014 гг. (23.0-24.7 °С), прохладным оказался и очень влажный сентябрь 2012 г. (24.5 °С). Самыми жаркими месяцами за период измерений были март-апрель 2013 г., май 2014 г. (27.1-27.5 °С). Самыми засушливыми условиями, неблагоприятными для растений, выделялись февраль-март 2013 и 2014 года.

Суточная амплитуда температуры была намного больше сезонной, что в принципе характерно для тропической зоны. В декабре 2012 г., январе 2013 и 2014 гг. ночью температура на 2 м высоты опускалась до 16...18 °С (температура верхних слоев почвы падала до 18.5-20 °С), а в марте 2013 г. днем поднималась до 35 ÷ 36 °С. Наименьшая амплитуда температуры наблюдалась в пик сезона дождей, в августе-сентябре: тогда ночью температура составляла 23 ÷ 24 °С, а днем доходила только до 27 ÷ 28 °С.

Влажные сезоны 2012 и 2013 гг. были неоднородны: преобладали дни с переменной облачностью, а полностью пасмурные дни были так же редки, как и полностью ясные. Осадки в основном ливневые, половина суточных осадков в среднем выпадала с 16:30 до 20:30.

Сухой сезон 2011-2012 г. оказался на 3 недели короче нормы⁵, 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. Влажные сезоны 2012 и 2013 гг. по сумме осадков были близки к норме. Интересно, что влажный сезон

⁵ Средней продолжительности сухого сезона за 1980-2010 гг. по критериям из работы (Дешеревская, 2013).

2012 г. начался 1 апреля с ливней вышедшего на сушу тропического циклона Паркхар, центр которого прошел недалеко от Кат Тьена; в сумме за двое суток выпало 123.7 мм.

Средняя за месяц минимальная относительная влажность воздуха во второй половине сухого сезона 2012-2013 и 2013-2014 гг. опускалась до 42 %, объемная влажность почвы падала до 10-12 %, т.е. подходила вплотную к условиям почвенной засухи, вызывающей устойчивое завядание растений.

Длина дня в течение года различается слабо, на 1 час 20 минут, но общее количество солнечной радиации в пик влажного сезона (сентябрь 2012 г.) было на треть меньше, чем во второй половине сухого сезона (март 2013 г.).

Месяцы с наименьшей температурой воздуха – в первой половине сухого сезона – оказались самыми ветренными, преобладал северный ветер. Но и в эти месяцы средняя скорость ветра не превышала $2.0-2.2 \text{ м с}^{-1}$. В пик влажного сезона в среднем скорость ветра составляла всего 1.4 м с^{-1} . Во влажный сезон преобладали юго-западные ветра, однако доля ветров других направлений была также велика. В переходные сезоны значительна была восточная компонента ветра.

3.2. Радиационный баланс

Приходящая на верхнюю границу экосистемы солнечная радиация расходуется на поддержание теплового, водного и углеродного обмена экосистемы с атмосферой. В данном разделе будут рассматриваться радиационные потоки между атмосферой и земной поверхностью, сумма которых формирует радиационный баланс, т.е. энергию, которая расходуется на функционирование экосистемы.

Общие замечания. Радиационный баланс (R_n) – приходная составляющая теплового баланса экосистемы, в т.ч. формирующая тепловое поле растительности и почвы (Будыко, 1956). Суммарное испарение, важная расходная часть водного баланса, при достаточном количестве влаги в экосистеме определяется радиационным балансом (Fisher et al., 2009; da Rocha et al., 2009). Малая доля (проценты) от приходящей солнечной радиации – это вся энергия, затрачиваемая на поддержание первичной продукции экосистемы, т.е. приходного компонента углеродного баланса. Три названных связи радиационного баланса - с тепловым, водным и углеродным балансами – обуславливают необходимость понимания, как формируется радиационный баланс на верхней границе экосистемы.

Радиационные потоки в зависимости от длины волны делят на коротковолновые (пришедшие от солнца, а также отразившееся обратно в атмосферу в практически неизменном виде) и длинноволновые (тепловое излучение атмосферы и поверхности). Отдельно выделяют фотосинтетически активную радиацию – ту часть солнечной радиации, которая может использоваться растениями для фотосинтеза (примерно половина от приходящей). Приходящая коротковолновая радиация (прямая, от солнца, и рассеянная, со всего небесного свода) называется также суммарной радиацией (R_s); отразившееся от земной поверхности коротковолновая – отраженной радиацией (R_{sup}).

Длинноволновый радиационный баланс (R_{lw}) представляет собой разницу между тепловым излучением поверхности (R_{lup}) и встречным излучением атмосферы (R_{ldo}). Составляющие длинноволнового баланса по закону Стефана-Больцмана зависят в 4-й степени от температуры излучающего тела. В тропических условиях R_{lw} всегда меньше нуля, т.к. температура поверхности больше температуры излучающих уровней атмосферы. Поэтому длинноволновый баланс в течение года отрицательный, земля отдает тепловое излучение.

Вся первичная продукция создается растениями за счет фотосинтетически активной радиации (ΦAP), или коротковолновой радиации в диапазоне 380-710 нм. Диапазон измерений сенсоров ΦAP составляет 400-700 нм.

Непосредственный перевод ΦAP , измеряющейся в количестве падающих фотонов за секунду на м^2 , в Ватты на м^2 затруднен, т.к. каждый фотон в зависимости от длины волны несет разную энергию. Так, 1 мкмоль фотонов красного участка спектра несут в среднем 0.177 Дж, а фиолетового – 0.293 Дж. В тропиках рассеяние высокоэнергетичных сине-фиолетовых фотонов в атмосфере происходит гораздо эффективнее, т.к. больше толщина и влагосодержание атмосферы, поэтому доходящая до земли ΦAP смещается в красную, менее энергоемкую, область спектра по сравнению с умеренными широтами (Руднев, 2003). Этим объясняются снижение возможностей для фотосинтеза тропических лесов по сравнению с лесами умеренных широт при одной и той же величине полученной солнечной радиации.

Радиационный баланс как сумма коротковолнового и длинноволнового балансов в сезонном ходе. Сезонный ход суммарной радиации в условиях тропиков с небольшими изменениями длины дня определяется двумя факторами: высотой солнца над горизонтом и количеством облачности. Кат Тьен расположен на 11.4°с.ш. , т.е. южнее северного тропика (23.5°с.ш.), на котором солнце бывает в зените раз в год, 22 июня. Поэтому в Кат Тьене солнце бывает в зените дважды в году: 20 апреля солнце переходит через зенит на северную сторону неба, а 24 августа возвращается на южную сторону, и с сентября по март перемещается по южной полусфере. В день зимнего солнцестояния 22 декабря полуденная высота солнца над горизонтом на широте Кат Тьена составляет лишь 55° ($90^\circ - \phi - 23.5^\circ$, где ϕ – широта) – для сравнения, примерно такая же высота солнца в Москве в день летнего солнцестояния, 22 июня. Согласно описанным астрономическим факторам, максимумы суммарной радиации должны были бы фиксироваться в апреле и в августе, но во второй половине влажного сезона резко возрастает количество облачности. Поэтому приходящая солнечная радиация максимальна в марте-мае, хотя второй максимум может наблюдаться в октябре. Суммарная радиация в течение периода наблюдений варьировала от $425.2 \text{ МДж м}^{-2} \text{ мес}^{-1}$ (сентябрь 2012 г.) до $650\text{--}660 \text{ МДж м}^{-2} \text{ мес}^{-1}$ (март-апрель 2012-2014 гг.) и даже

695.9 МДж м⁻² мес⁻¹ (май 2014 года). Максимум коротковолнового радиационного баланса (разница между пришедшей и отраженной солнечной радиацией) был зафиксирован в марте-апреле (Рисунок 4).

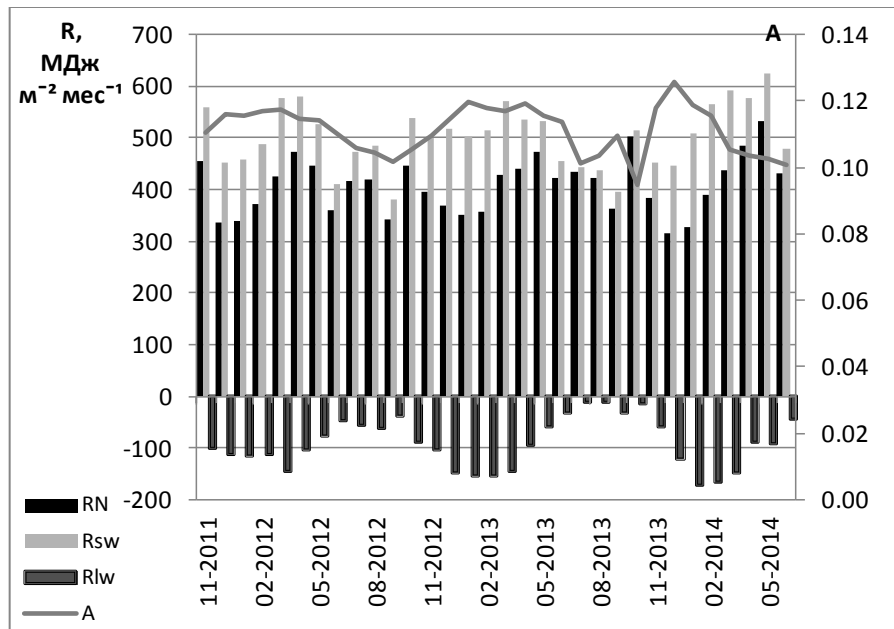


Рисунок 4 – Альbedo полога A и радиационные потоки над лесом R : радиационный баланс (Rn), коротковолновый радиационный баланс (Rsw), длинноволновый радиационный баланс (Rlw)

Сезонное изменение отражательной способности поверхности, или альbedo⁶, оказалось небольшим (Рисунок 4): от 10.0 % в сентябре до 11.8...12.0 % в марте-апреле (резкие колебания альbedo в сухой сезон 2013-2014 гг., по-видимому, можно считать искусственными артефактами измерений).

Rlw был отрицательным и в среднем по модулю составлял $\frac{1}{4}$ от полного радиационного баланса, но в некоторые облачные дни среднесуточные значения Rlw достигали по модулю 90-100 % от значений Rn . Тепловое излучение поверхности $Rlup$ хорошо коррелировало с температурой воздуха на 30 м ($R^2=0.86$, после исключения сезонного тренда $R^2=0.76$). Среди факторов, определяющих встречное излучение атмосферы (т.е. поток длинноволнового излучения от атмосферы к земле), наиболее значимым была облачность ($R^2=0.77$),

⁶ Альbedo определено по методике (Culf et al., 1995): рассчитывается отношение суточной суммы отраженной радиации к суммарной, а затем полученные суточные значения альbedo осредняются по месяцам.

выраженная с помощью индекса ясного неба CSI^7 (Marty, Philipona, 2000). Сумма длинноволнового баланса изменялась от $-37.9 \text{ МДж м}^{-2} \text{ мес}^{-1}$ (в пик влажного сезона) до $-171.3 \text{ МДж м}^{-2} \text{ мес}^{-1}$ (в самый прохладный месяц за 2.5 года – январь 2014 года). Снижение по модулю значений баланса во влажный сезон связано именно с увеличением облачности: облачность одновременно повышает приходный член R_{ldo} и снижает температуру поверхности, таким образом снижая расходный член R_{lup} .

Итоговый радиационный баланс (сумма коротковолнового R_{sw} и длинноволнового R_{lw} балансов) составлял от 57 % (в прохладные месяцы сухого сезона) до 87-89 % (в пик влажного сезона) от суммарной радиации, а суммы радиационного баланса колебались от $314.5 \text{ МДж м}^{-2} \text{ мес}^{-1}$ (декабрь 2013 г.) до $531.7 \text{ МДж м}^{-2} \text{ мес}^{-1}$ (май 2014 года). Дисперсия суточных сумм радиационного баланса на 81 % (здесь и далее при вычислении коэффициентов детерминации и корреляции использовался уровень значимости $\alpha=0.05$) определялась коротковолновой приходной частью баланса (Рисунок 5, а). Хотя после исключения сезонного тренда часто наблюдается уменьшение корреляции метеорологических величин, в данном случае после исключения сезонного хода в скользящем окне 30 дней коэффициент детерминации между R_s и R_n возрос до 92 % (Рисунок 5, б). Это объясняется тем, что в сезонном ходе R_{sw} и R_{lw} изменяются не одновременно, при этом изменения R_{lw} очень плавные; сезонная динамика R_{lw} выражена ярче, чем суточная. Длинноволновый баланс оказывает выраженное влияние на полный радиационный только во второй половине сухого сезона; r^2 регрессии R_s - R_n во влажный сезон составлял 0.96.

⁷ Clear sky index; рассчитывается по дефициту водяного пара и температуре приземного воздуха, а также нисходящей длинноволновой радиации. Индекс изменяется от 0.8-0.9 до 1.3-1.4, небольшие значения означают ясную погоду, большие – пасмурную. В случае Кат Тьена ясную погоду означал $CSI < 1.03$ (см. пояснения далее в тексте про суточный ход CSI). В строгом смысле, коррелировать величины, одна из которых рассчитывается с учетом другой, нельзя. Но так как нисходящая длинноволновая радиация и облачность имеют разную физическую природу, можно сказать, что эти величины связаны.

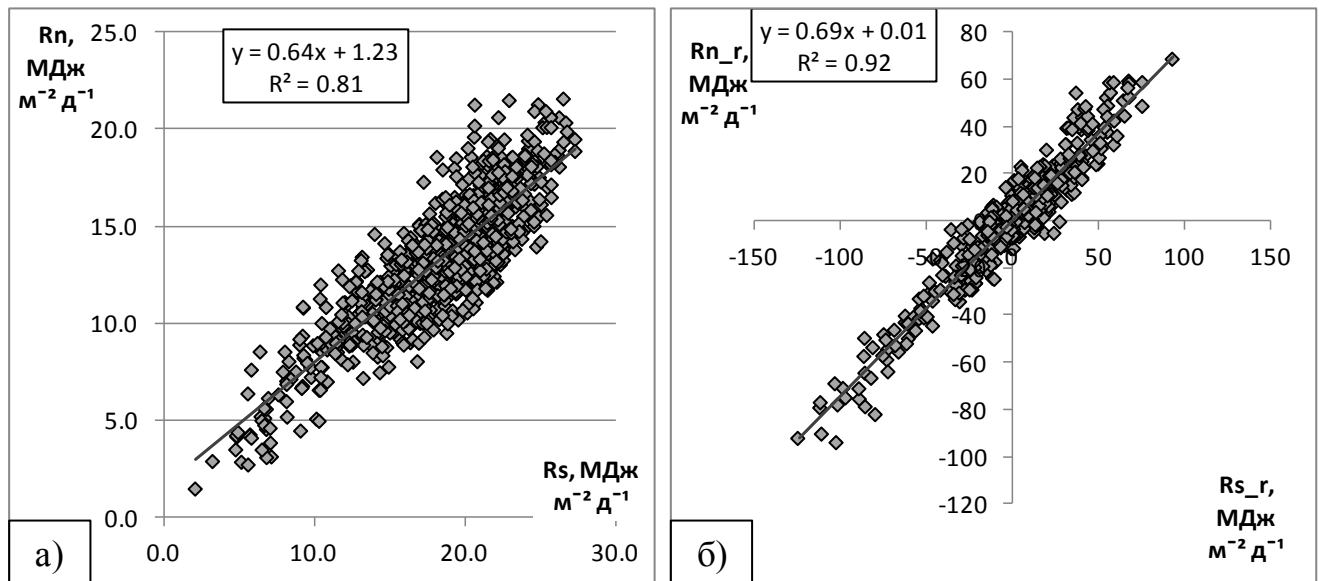


Рисунок 5 – Радиационный баланс (R_n), суммарная радиация (R_s):

а) – суточные суммы;

б) – суточные суммы после удаления сезонного тренда в скользящем окне 30 дней (индекс $_r$)

Итого, радиационный баланс в основном определялся факторами изменений коротковолнового баланса (R_{sw}): максимальной высотой солнца над горизонтом и облачностью.

Сравнение радиационного баланса в Кат Тьене с другими тропическими лесами мира. Годовая сумма радиационного баланса за 2012 г. в Кат Тьене составила $4829 \text{ МДж м}^{-2} \text{ г}^{-1}$, за 2013 г. – $4841 \text{ МДж м}^{-2} \text{ г}^{-1}$, что превышает известные суммы радиационного баланса за год для всех литературных данных, кроме одного года на станции Букит Соехарто в Индонезии (Таблица 2). Суммы для станций К34 (Манаус, Бразилия) и JRU (Жи Парана, Бразилия) были на 5-8 % меньше, а на прочих станциях составляли менее 90 % от сумм в Кат Тьене. Причем в Кат Тьене радиационный баланс в сухие сезоны 2011-2014 составлял $147, 149$ и 136 Вт м^{-2} , а во влажные сезоны 2012 и 2013 – больше: 157 и 161 Вт м^{-2} . За исключением полулистопадного тропического леса станции JRU-Жи Парана (аналогичные величины 142 и 147 Вт м^{-2}), для тропических лесов Амазонии радиационный баланс во влажный сезон меньше, чем в сухой (обзор: Da Rocha et al., 2009).

Таблица 2. Радиационный баланс тропических лесов

Станция	(код FLUX-NET*)	Широта(ю.ш. со знаком -)	Годы измерений	Rn, МДж м ⁻²	Ссылка
Юго-Восточная Азия					
<i>Вьетнам</i>					
Нам Кат Тьен (Nam Cat Tien)	NCT	11°26′	2012-2013	4829, 4841	Данная работа
<i>Малайзия</i>					
Пасо (Pasoh)	PSO	2°53′	2003-2010	4199-4753	Kosugi et al., 2012
Маеклонг (Mae Klong)	MKL	14°34′	2003-2004	4370, 4199	Huete et al., 2008; Fisher et al., 2009
Сакаерат (Sakaerat)	SKR	14°29′	2001-2004	3858-4114	Huete et al., 2008; Fisher et al., 2009
<i>Индонезия</i>					
Букит Соехарто (Bukit Soeharto)	BKS	0°52′	2001-2002	3899, 5521	Huete et al., 2008; Fisher et al., 2009
Janlappa nature reserve, Западная Ява, Индонезия		-6°	1980-1981	3730	Calder et al., 1986
Южная и Центральная Америка					
<i>Бразилия, Амазония</i>					
Дуки (Duce)		-2°57′	-	3600	Shuttleworth, 1988
Биоложика ду Куэйрас (Biológica do Cuieiras)	M14	-2°35′	1995-1996	4100	Malhi et al., 2002
K83 Тапажос (Floresta Nacional do Tapajos)	S83	-3°01′	2000-2003	3895, 3998	Da Rocha et al., 2004, 2009
K34, Манаус	K34	-2°36′	1999-2006	4451	Da Rocha et al., 2009
K67, Сантарем	S67	-2°51′	2003-2005	4009	Da Rocha et al., 2009
Жару (Jaru), Жи Парана	JRU	-10°05′	1999-2002	4586	Da Rocha et al., 2009
Синоп (Sinop), Мату-Гросу	SIN	-11°14′	1999, 2001	4152	Da Rocha et al., 2009
Рио Жаваес (Rio Javaés), Токантинс, Бразилия	JAV	-9°49′	2004-2006	4272	Da Rocha et al., 2009
Пе де Жижанти (Pe de Gigante), Сан-Паулу	PEG	-21°37′	2001-2003	4210	Da Rocha et al., 2009
Санту-Антониу-ду-Левержер (Santo Antonio do Leverger), Мату-Гроссу		-15°43′	2009-2010, 2010-2011	3767, 3504	Rodrigues et al., 2013

* Станции FLUXNET – мировой сети пульсационных наблюдений – имеют кодовые трехзначные названия. В таблице приведены названия в соответствии с интернет-сайтом FLUXNET <http://fluxnet.ornl.gov/>

Из тропических влажных лесов Амазонии на станции К34 (Манаус) фиксируется максимальная радиация во влажный сезон, составляющая в среднем всего 137 Вт м^{-2} . По-видимому, это связано с тем, что в более континентальном климате центральной и южной Амазонии облачность и осадки достигают дневного максимума уже к 14-15 ч (Kousky, 1980; Rickenbach, 2004), в то время как в муссонном климате Южного Вьетнама – только к 17-18 ч. Летом в Южном Вьетнаме преобладают океанические воздушные массы, пришедшие с юго-запада. Океан достаточно прогревается только во второй половине дня, когда восходящие движения воздуха и испарение с поверхности усиливается. Вследствие вечернего максимума облачности земная поверхность получает больше радиации днем. К тому же, в Кат Тьене (в отличие от К67 и К83 в Амазонии) оба максимума возможной радиации в годовом ходе (солнце в зените: 20 апреля, 24 августа) приходились на влажный сезон, вследствие чего во влажный сезон в целом поверхность получала сравнительно много солнечных лучей.

Альbedo А (отражательная способность поверхности) служит связующим звеном между радиационным режимом, фенологией и гидрологией экосистемы. Альbedo сильно зависит от площади лесных окон и состояния полога: количества облиственных деревьев, соотношения молодых и старых листьев. Альbedo даже влажных тропических лесов достоверно меняется в сезонном ходе (Таблица 3).

Изменения в альbedo подробно рассматриваются в гидрологических работах по тропикам (например, Roberts et al, 2005); альbedo даже называют «параметром испарения» (Bruijnzeel, 2004), т.к. роль изменений альbedo для хода испарения может быть столь же велика, как и сезонные изменения суммарной радиации и облачности. Поэтому, несмотря на малые различия в сезонном ходе альbedo леса в Кат Тьене, альbedo будет рассматриваться здесь столь подробно. К тому же, как будет сказано далее, малые зафиксированные различия могут быть вызваны и спецификой методики наблюдений, но для уточнения этого момента требуется время и дополнительные измерения.

Небольшие изменения альbedo в сезонном ходе в Кат Тьене связаны с сохранением достаточно густого полога нижних-средних подъярусов леса даже в пик сухого сезона и, возможно, спецификой «поля зрения» пиранометра.

Таблица 3. Минимальное и максимальное среднемесячное альbedo (A) тропических лесов

Станция	Тип леса *	Годы измерений	A (min-max), %	Ссылка
<i>Юго-Восточная Азия</i>				
<i>Вьетнам</i>				
Нам Кат Тьен (Nam Cat Tien)	SE	2012-2013	10.5-12.0	Данная работа
<i>Таиланд</i>				
Кхорат (Khorat)	SE	1970	12.0-13.3	Pinker et al., 1980
<i>Малайзия</i>				
Пасо (Pasoh)	WE	1995-1999	12	Tani et al., 2003
<i>Китай</i>				
Сишуанбаньна (Xishuangbanna)	H	2005-2006	12-20	Guardiola-Claramonte et al., 2008
<i>Африка</i>				
<i>Нигерия</i>				
Южная Нигерия	WE	-	12-13	Oguntoyinbo, 1970
<i>Южная Америка</i>				
<i>Бразилия</i>				
Вале (Vale), Мараба	WE	1990-1993	12.0-16.5	Culf et al., 2005
Жару (Jaru), Жи Парана	WE	1990-1993	12.0-14.4	Culf et al., 2005
Дуки (Ducke)	WE	1983, сент.	12.3	Shuttleworth, 1984
Дуки (Ducke)	WE	1990-1993	10.8-13.3	Culf et al., 2005
Биоложика ду Куэйрас (Biológica do Cuieiras)	WE	1995-1996	11.7-13.3	Malhi et al., 2002
Манаус КМ34 (Manaus KM34)	WE	1999-2000	11.4-12.6	Araújo et al., 2002

* Типы тропических лесов: влажный вечнозеленый – WE, переменновлажный вечнозеленый – SE; плантация гевеи – H

Интересно, что во второй половине влажного сезона альbedo полога на 1.5-2 % ниже, чем в сухой сезон. Такое изменение альbedo в сентябре по сравнению с апрелем дает прибавку в 6.8 МДж уловленной радиации, что сравнимо с дополнительными 0.6 дня для фотосинтеза (если бы разница составляла 6 %, то «дополнительных дней» было бы уже 2; как показано далее,

такая разница возможна). Повышение альбедо в сухой сезон может быть обусловлено двумя факторами: 1) сезонное изменение альбедо в зависимости от состояния полога (меньшая плотность лесного полога; различия в отражательной способности молодых и старых листьев) 2) различие в альбедо в пасмурные и в ясные дни (иначе, различное отражение прямой и рассеянной радиации).

Эффект первого фактора зависит от характеристик поверхности, которая попадает в поле зрения пиранометра – соотношения листопадных/вечнозеленых деревьев в поле зрения датчика. Пиранометр чувствителен к углу прихода радиации. В случае использующегося на измерительной станции радиометра NR-01 чувствительность изменяется по закону косинуса: к лучам, приходящим с горизонта (90°), нулевая чувствительность, с 60° – $\frac{1}{2}$, с надира – 1. Т.е., если бы датчик находился на высоте 50 м над измеряемой поверхностью, он показывал бы характеристики растительности, расположенной прямо под ним, на 100 %, по кругу 50х50 м – на 71 %, по кругу 87х87 м - наполовину, а в круге 200х200 м – примерно на четверть. В реальных измерениях эта картина усложняется различной высотой и формой крон деревьев под датчиком. В измерениях в Кат Тьене датчик NR-01 в основном направлен на деревья с высотой около 17 м. В зону 50 %-ной чувствительности NR-01 попадают в основном вечнозеленые деревья 3-4 подъяруса, но также три листопадных дерева: один диптерокарпус (*Dipterocarpus Turbinatus*) высотой около 40 м и две лагерстремии (*Lagerstroemia Calyculata*) высотой около 18 м. Т.е., в принципе, возможно, что снижение альбедо обусловлено как изменением характеристик листьев вечнозеленых деревьев, так и заменой листьев у диптерокарпа и лагерстремий. Выяснение причин изменения альбедо требует дополнительных исследований отраженной от полога радиации.

Что касается второго фактора, то при увеличении доли пасмурных дней альбедо полога, напротив, должно было бы повышаться. Увеличение альбедо отдельного листа видов *Dipterocarpus Alatus*, *Hopea Odorata*, *Dalbergia Tonkinensis* до 27-32 % при низких значениях суммарной радиации экспериментально доказано в работе (Руднев, 2003, стр. 132). Если предположить, что листья в

пологе равномерно распределены по всем углам к горизонту (это предположение в моделях лесного полога часто делается – см. (Pury, Farquhar, 1997)), то такая же закономерность должна выполняться для всего полога в целом. Это подтверждают данные измерений (Рисунок 6, а).

Низкоинтенсивная радиация (ниже 200 Вт м^{-2}) в сентябре 2012 г. фиксировалась в 48 % 30-мин периодов, в то время как во второй половине сухого сезона – только в 28 % (Рисунок 6, б). Однако альbedo полога в сентябре снижено для любой интенсивности радиации, причем снижение значимо статистически (Рисунок 6, а). А следовательно, изменения альbedo полога – следствие сезонного изменения характеристик растительности.

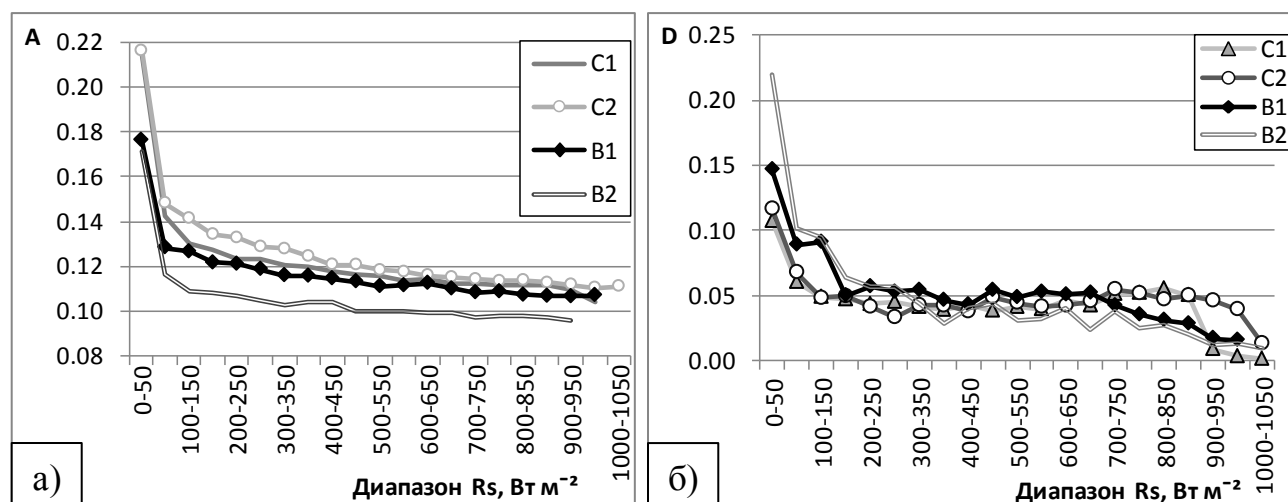


Рисунок 6 – Радиационные характеристики полога в первой половине сухого сезона (C1), во второй половине сухого сезона (C2), в первой половине влажного сезона (B1) и во второй половине влажного сезона (B2):

а) Среднее альbedo (A) в зависимости от диапазона суммарной радиации, шаг 50 Вт (Диапазон Rs);

б) Доля (D) суммарной радиации по диапазонам, шаг 50 Вт (Диапазон Rs)

Альbedo полога в сентябре при слабой радиации ($0-150 \text{ Вт м}^{-2}$) на 3-4 % ниже, чем в апреле, полог в целом темнее. Возможно, это приспособление деревьев тропического леса к пику влажного сезона, когда влаги достаточно – попытка уловить как можно большую часть поступающей радиации.

Молодые листья могут иметь существенно большее A (по крайней мере, это верно для вида *Dipterocarpus Alatus* – см. Руднев, 2003, стр. 131), и повышение

отражательной способности полога могут давать деревья, сменившие листья. Виды *Dipterocarpus Alatus* и *Turbinatus*, *Afzelia Xylocarpa* и некоторые другие образуют листья новой генерации в разгар сухого сезона. Образование листьев в конце сухого сезона характерно и для других сезонных тропических лесов, например, в Бразилии (Jackson, 1978) и в Индии (Shukla, 1982). До сих пор не ясно подобное поведение деревьев. В полностью листопадных тропических лесах деревья испытывают водный стресс и сбрасывают листья в сухой сезон для снижения транспирации. Со снижением засушливости зависимость фенологии от влаги слабеет, и в этом случае триггерными факторами могут оказываться сочетание температуры и влажности, длина дня и возраст древостоя, внутренние корреляции роста и сочетание биотических и абиотических факторов (Murphy, Lugo, 1986; цитируют другие работы).

Значения A , полученные на измерительной станции в Кат Тьене (смешанный лес с тенденцией к доминированию вида *Lagerstroemia Calyculata*), намного выше расчетных (Руднев, 2003) $A=7.3 \%$ для леса Мада с тенденцией к доминированию диптерокарповых, а также для крон видов семейства диптерокарповые: *Dipterocarpus Alatus* ($A=8.1 \%$), *Hopea Odorata* (4.3%) и *Shorea Cochinchinensis* (3.9%). Скорее всего, расчетные значения Руднева занижены; в то же время, измеренные значения в Кат Тьене могут быть более высокими по сравнению с лесом из диптерокарповых пород.

Фотосинтетически активная радиация (ΦAP). В целом, во влажный сезон (выявленный по экосистемным критериям) 2012 и 2013 гг. количество приходящей ΦAP составило 31.9 и 32.6 моль m^{-2} день $^{-1}$, в сухие сезоны 2011-2012, 2012-2013 и 2013-2014 – 37.5, 38.5, 37.7 моль m^{-2} день $^{-1}$. Таким образом, во влажный сезон в целом ΦAP снижалась на 15 % относительно сухого сезона вследствие увеличения облачности, в то время как суммарная радиация (R_s) снижалась только на 10 %. Данный факт, скорее всего, связан с периодическими снижениями доли $\Phi AP/R_s$, а не эффектом собственно влажного сезона.

Дисперсия ΦAP на 94 % в среднем определялась суммарной радиацией (Рисунок 7, а), при исключении сезонного хода R^2 возрастал до 98 %. В каждом

сезоне по отдельности коэффициенты корреляции достигают 98-99 % (Рисунок 7, б, в, г).

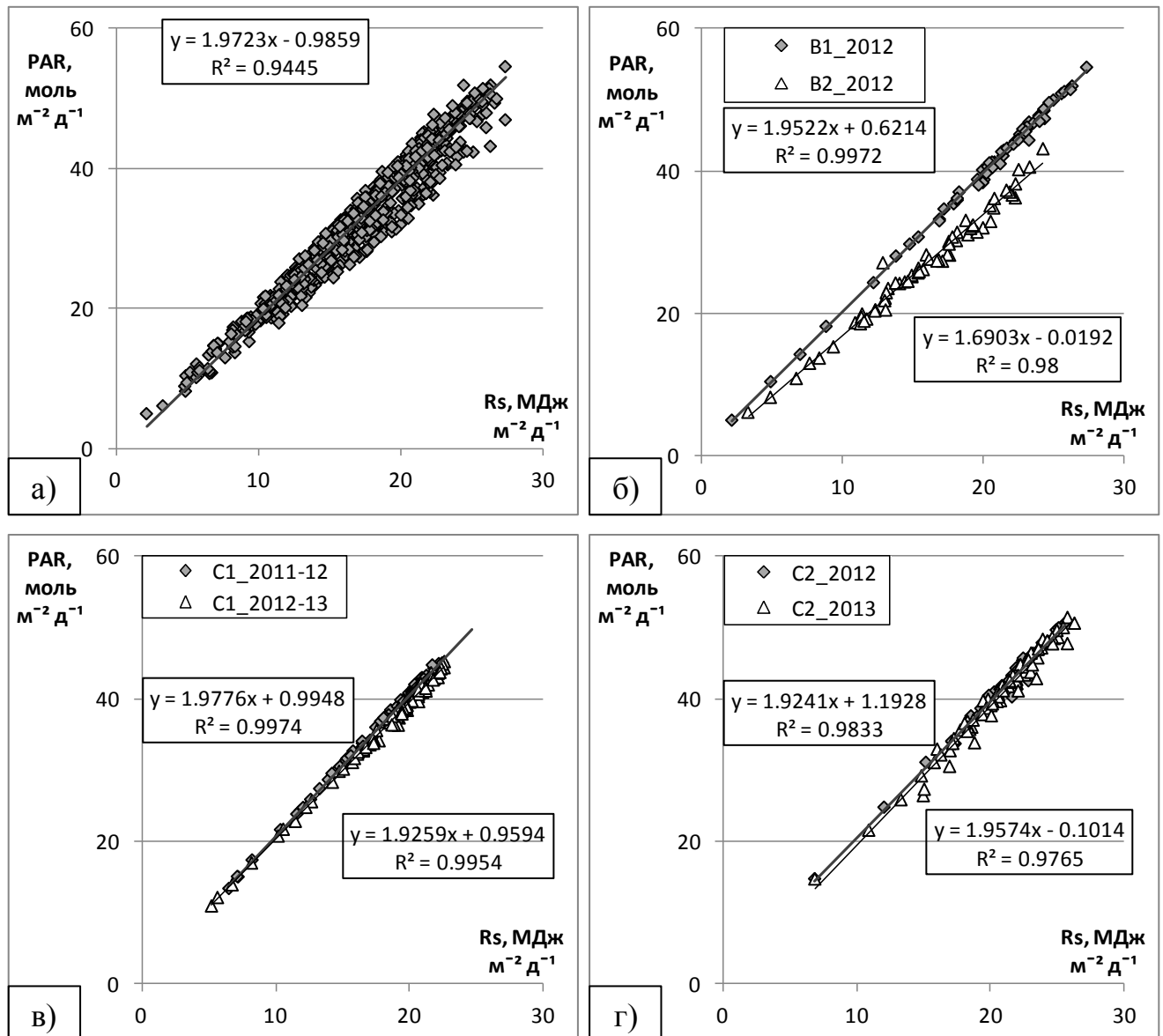


Рисунок 7 – Соотношение суточных значений суммарной радиации (R_s) и фотосинтетически активной радиации (PAR) за периоды:

а) Весь период наблюдений с 11.2011 по 05.2014;

б) Влажный сезон 2012 г.: 1-ю половину, апрель-май (B1) и вторую половину, август-сентябрь (B2);

в) 1-ю половину сухого сезона: ноябрь 2011-январь 2012 (C1_2011-12), ноябрь 2012-январь 2013 (C1_2012-13);

г) 2-ю половину сухого сезона: февраль-март 2012 г. (C2_2012) и февраль-апрель 2013 г. (C2_2013)

Отношение $\Phi AP/R_s$ оставалось примерно постоянным в течение года (Рисунок 7, б), за исключением некоторых периодов. В июле-сентябре 2012 г., мае-июне 2013 г. при такой же интенсивности солнечной радиации, как и в остальное время года, значение ΦAP было ниже. Увеличение облачности, снижение сумм R_s должно приводить к обратному эффекту – возрастанию доли $\Phi AP/R_s$ (Stigter, Musabilha, 1982; Meek et al., 1984): в пасмурные дни, а также при низкой интенсивности радиации в течение дня доля $\Phi AP/R_s$ обычно выше. Аналогичный эффект наблюдается в утреннее и вечернее время (Шульгин, 2009, с. 47). Снижение доли $\Phi AP/R_s$ в некоторые периоды в Кат Тьене пока не объяснено.

Среднегодовое значение ΦAP за 2012 г. составило $12251 \text{ моль м}^{-2}$, а за 2013 г. – $12452 \text{ моль м}^{-2}$. Отношение $\Phi AP/R_s$ в Кат Тьене составило $2.54 \text{ мкмоль Дж}^{-1}$ в среднем за 2012 г. и $2.57 \text{ мкмоль Дж}^{-1}$ за 2013 год. Для западной части США то же отношение составляет $2.04 \pm 0.06 \text{ мкмоль Дж}^{-1}$ для ясной погоды (McCree, 1966); для южной Испании – $2.0\text{-}2.1 \text{ мкмоль Дж}^{-1}$ (Alados et al., 1996); для центральной Нигерии – 2.02 и $2.12 \text{ мкмоль Дж}^{-1}$ в сухой и влажный сезон соответственно (Udo, Aro, 1999). Более высокое значение $\Phi AP/R_s$ в Кат Тьене относительно приведенных данных также пока не объяснено.

Суточный ход составляющих радиационного баланса. На Рисунке 8 показаны месяцы, ход составляющих радиационного баланса в которые наиболее выразительно характеризует прохладную и сухую первую половину сухого сезона (декабрь 2011 или 2014 г.), жаркую и засушливую вторую половину сухого сезона – самое начало влажного сезона (март 2012, апрель 2013 или май 2014 г.), пик влажного сезона (сентябрь 2012 года).

В марте 2012 г. радиационный баланс достигал максимума в 726 Вт м^{-2} в среднем за полчаса, с 12:00 до 12:30 (Рисунок 8, а), составляя 80 % от суммарной радиации. Самый низкий полуденный радиационный баланс (максимальное 30-минутное значение в среднем за месяц) наблюдался в пик влажного сезона – 505 Вт м^{-2} , составлял 85 % от суммарной радиации. Таким образом, пиковые

суммы радиационного баланса во 2-й половине влажного сезона на 30 % ниже, чем во второй половине сухого сезона.

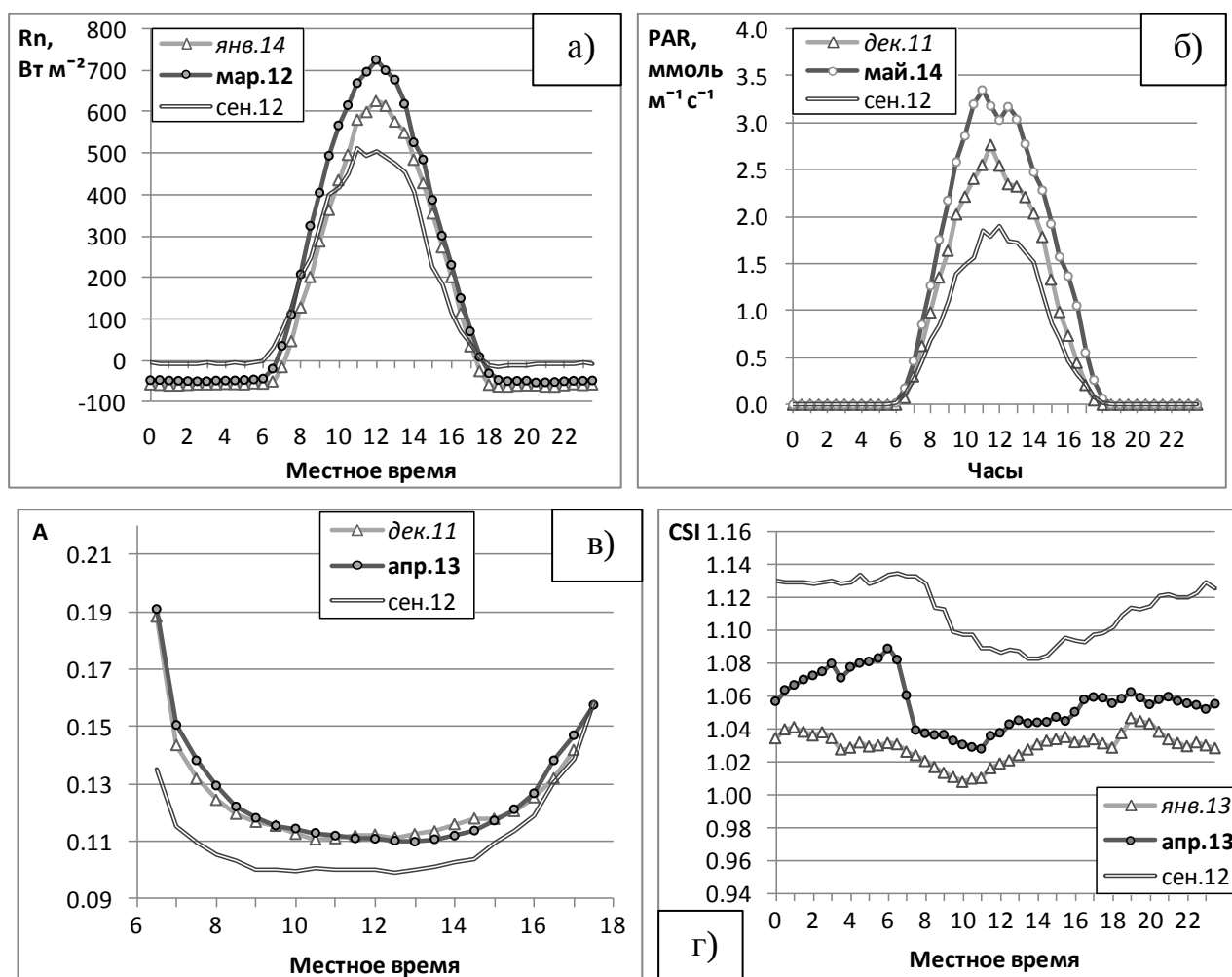


Рисунок 8 – Суточный ход метеорологических параметров в периоды года с характерными условиями: первая половина сухого сезона (дек.11, янв.13, янв.14), вторая половина сухого сезона – начало влажного сезона (мар.12, апр.13, май.14), пик влажного сезона (сен.12):

а) Радиационный баланс (R_n);

б) Фотосинтетически активная радиация (PAR);

в) Альbedo (A) с 6:30 до 17:30;

г) Индекс ясного неба (CSI) – рассчитывается по дефициту водяного пара и температуре приземного воздуха, а также нисходящей длинноволновой радиации. Индекс изменяется от 0.8-0.9 до 1.3-1.4, небольшие значения означают ясную погоду, большие – пасмурную. В случае Кат Тьена ясную погоду означал $CSI < 1.03$ (см. пояснения в тексте)

Максимум радиационного баланса в среднем за весь период наблюдений приходится на 12 ч, минимум – на 18:30. Время максимума радиационного

баланса совпадает со временем максимума суммарной радиации. Минимум радиационного баланса сразу после захода солнца связан с тем, что температура поверхности максимальна за ночь и максимален поток уходящей в атмосферу инфракрасной радиации, в то время как суммарная радиация уже близка к нулю.

Максимум ΦAP наблюдался в суточном ходе (в среднем за весь период наблюдений) так же, как и у суммарной радиации, в 12 ч (Рисунок 8, б). В марте ΦAP начинала возрастать в 5:30 утра, приближалась к нулю в 18:30; в декабре период прихода ΦAP снижался до 6:00-17:30; в сентябре 5:30-18:00 ч. В мае 2014 г. ΦAP достигала максимальных значений (30-минутный максимум в среднем за месяц) за все время наблюдений – $3351 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В сентябре средний максимум оставался на уровне $1720 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, т.е. всего 55 % от значений второй половины сухого сезона. Таким образом, снижение ΦAP во второй половине влажного сезона чрезвычайно существенно и аналогично снижению суммарной радиации.

Альбедо лесного полога повышалось в утренние и вечерние часы, достигая в среднем за получасовые вечерние интервалы 16-19 % и более (Рисунок 8, в). Минимальное за день альбедо фиксируется с 10 до 13 ч, при максимальном отношении прямой/рассеянной радиации.

Облачность минимальна (CSI достигает минимума) в 9-11 ч в сухой сезон и только в 13-14 ч во влажный сезон (Рисунок 8, г). Облачность в среднем выше в ночное время. Если утром образуется туман, то CSI может давать максимум около 6 ч утра. Для 10-мин интервалов и станций в Альпах (Marty&Philipona, 2000) рекомендуют как границу ясного/пасмурного неба $CSI=1.00$. Однако в условиях Кат Тьена для суточных средних, по независимым визуальным наблюдениям облачности в сравнении с расчетным индексом CSI, за границу лучше принять $CSI=1.03$. Тогда ясными будут примерно треть дней в первую половину сухого сезона; от половины до 2/3 – во второй половине сухого сезона; во влажный сезон полностью ясные дни и тем более ночи – редкое исключение (11 дней на 206 дней влажного сезона 2012 г.). Тем не менее, и полностью пасмурные дни во влажный

сезон также наблюдаются редко (только 14 дней на 206 дней влажного сезона 2012 года).

Таким образом, в сухой период года количество ясных дней составляло треть от всех в начале сухого сезона и до двух третей в конце сухого сезона, в остальные дни наблюдалась переменная облачность и очень редко – пасмурная погода. Что же касается влажного сезона, в 9 из 10 дней влажного сезона в Кат Тьене наблюдалась переменная облачность, что, в общем, опровергает мнение о сезоне дождей в Южном Вьетнаме как постоянно пасмурном времени.

Выводы по разделу. Измерительная станция в Кат Тьене в целом характеризовалась очень большим количеством суммарной радиации и высоким радиационным балансом относительно других тропических лесов Юго-Восточной Азии и Амазонии. Таким образом, лес Кат Тьена получает значительные энергетические ресурсы для поддержания потоков тепла, влаги и углекислого газа. Эти ресурсы, в противоположность многим влажным тропическим лесам, даже увеличиваются во влажное полугодие, создавая очень благоприятные условия для фотосинтетической и транспирационной активности – большое количество света при обилии влаги.

Отчасти высокие годовые ресурсы радиации связаны с низкой отражательной способностью (альбедо) леса. За счет постоянно зеленых нижних подъярусов лес весь год поглощает 87-90 % падающей на него солнечной радиации, отражая в солнечном спектре только десятую часть.

Но основная причина значительного радиационного баланса лежит, по-видимому, в суточном распределении облачности и осадков в Южном Вьетнаме. Так как максимум осадков приходится на вечернее время, а максимум облачности – на ночное время, днем земная поверхность получает значительное количество солнечной радиации даже во влажный сезон. Это подтверждается и расчетами количества облачности: полностью пасмурные дни в среднем за влажный сезон составляют только десятую часть всех дней, а преобладает переменная облачность. Вечерний-ночной максимум облачности – черта климата, на который значительное влияние оказывает океан. 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. Необычный вывод здесь заключается в том, что в сезон дождей в муссонном климате могут складываться более благоприятные условия по количеству солнечной радиации для природных экосистем, чем круглогодично в постоянно-влажном климате экваториальной зоны.

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

4.1. Тепловой баланс

Всю энергию для потоков тепла в экосистеме обеспечивает приход лучистой энергии – радиационный баланс. К потокам тепла в экосистеме относятся турбулентный поток тепла в атмосферу, турбулентный поток энергии, затраченной на суммарное испарение, поток тепла в почву. Также в тепловом балансе участвуют запасы тепла в экосистеме: в верхнем слое почвы, а также в слое атмосферы и растительности от земли до уровня измерений турбулентных потоков. Изменения запасов также приравниваются здесь к потокам тепла.

В данном разделе будут рассматриваться потоки и запасы тепла в экосистеме муссонного тропического леса. В основном внимание будет уделено потоку явного тепла, потоку тепла в почву и изменениям запаса тепла в верхнем слое почвы и в экосистеме до высоты 50 м, – так как ход радиационного баланса подробно освещен в разделе 3.2, а поток скрытого тепла будет рассматриваться в разделе 4.2. Обсуждается проблема невязки теплового баланса: невязка играет важную роль в коррекции пульсационных измерений.

Общие замечания. Уравнение теплового баланса (1) представляет собой равенство приходящей энергии и расходных компонентов в различных формах (по Будыко, 1956). Приходный компонент теплового баланса только один – это радиационный баланс (R_n). Расходная часть уравнения складывается из затрат тепла на суммарное испарение (LE), затрат тепла на турбулентный теплообмен с атмосферой (H), потока тепла в почву (G), затрат энергии на фотосинтез (E_{ph}) и изменения запасов тепла в почве (ΔE_s), воздухе (ΔE_a) и растительности (ΔE_p).

Турбулентный поток тепла в атмосферу (H) называется также явным теплом, а турбулентный поток суммарного испарения (LE) – скрытым теплом.

$$R_n = LE + H + G + E_{ph} + \Delta E_s + \Delta E_a + \Delta E_p \quad (1)$$

Так как все основные компоненты теплового баланса на стандартных станциях сети FLUXNET измеряются, замыкание (действительно ли левая часть формулы (1) равна правой по реальным измерениям) теплового баланса служит мерой погрешности пульсационного метода. Если левая или правая часть уравнения больше, возникает невязка теплового баланса.

Под невязкой теплового баланса Res (Foken, 2008, eq.3) понимают разность между доступной энергией (радиационным балансом) и расходными компонентами, в том числе: турбулентной энергией (сумма потоков явного и скрытого тепла), потоком тепла в почву, – с учетом изменений запаса тепла в экосистеме:

$$Res = R_n - LE - H - G - E_{ph} - \Delta E_s - \Delta E_a - \Delta E_p \quad (2)$$

Исследование (Wilson et al., 2002) на 22 станциях сети FLUXNET в разных природных зонах показало, что в среднем невязка теплового баланса составляет 20 %, не зависит от широты и типа измерительных приборов. Предполагалось, что невязка может быть связана с переоценкой доступной энергии, недостаточным учетом запаса тепла в экосистеме, либо с недооценкой турбулентных потоков по какой-либо причине.

Фокен (Foken, 2008) приводит обзор работ, посвященных проблеме невязки теплового баланса, и связывает невязку с вихрями большого размера, которые не улавливаются пульсационной системой и могут не взаимодействовать с поверхностью земли. В пользу подобного объяснения говорят несколько аргументов: 1) точность измерений радиационного баланса и турбулентных потоков тепла существенно возросла за период 1990-е и 2000-е, однако это не привело к уменьшению невязки; невязка значительно превышает существующие погрешности измерений; 2) изменение запаса тепла в почве (выше датчиков потока тепла в почву), воздухе и растительности учитывается с хорошей

точностью и не компенсирует невязку; 3) в однородных ландшафтах (пустыня, ровная ненарушенная степь) невязка стремится к нулю, а в сложных ландшафтах (леса, ландшафты с неоднородным растительным покровом) повышается до 10-20 %; 4) в эксперименте LITFASS-2003 (Beyrich et al., 2006) прямые измерения потоков тепла альтернативным методом с масштабом осреднения по пространству около 5 км (с помощью широкоугольного сканирующего сцинтиллометра и микроволнового сцинтиллометра) показывали потоки на 20-50 Вт м⁻² выше, чем метод пульсационных наблюдений, что может как раз закрыть невязку теплового баланса. Казалось бы, пункт 3 противоречит гипотезе Фокена; однако, оказывается, эффект переноса энергии с земной поверхности вихрями большого размера над однородными ландшафтами исчезает (Eddy..., 2012). Точность измерений и радиационного баланса, и всех других расходных компонентов теплового баланса вызывает меньше сомнений, чем точность измерений турбулентных потоков. Важно, что на уровне ландшафта поток тепла и влаги будет больше, чем прямо измеряется методом пульсационных наблюдений.

Таким образом, вихри больших масштабов (характерное время жизни – несколько часов) в неоднородных ландшафтах дополнительно уносят влагу и тепло с поверхности земли. Как временный метод решения проблемы невязки предлагается (Foken, 2008) распределять невязку (излишек тепла, полученного поверхностью) между явным и скрытым потоком тепла согласно отношению Боуэна (H/LE), однако проблема нуждается в дополнительном теоретическом и практическом анализе. Ранее ставился вопрос об увеличении и потока углекислого газа на величину, пропорциональную невязке теплового баланса (Twine et al., 2000). В 2010-х гг. вопрос продолжает дискутироваться. Общепринятые рекомендации сводятся к тому, что корректировать поток углекислого газа не требуется (Eddy..., 2012). Ночные потоки не подвержены невязке, а для дневных потоков CO₂ пока не разработан теоретический и алгоритмический базис для конкретной корректировки, но исследования в этой области продолжаются (Eddy..., 2012).

Коррекция на невязку теплового баланса для турбулентных потоков тепла и влаги обычно осуществляется на суточных значениях, чтобы сгладить неоднородности суточного хода.

Потоки тепла в экосистеме имеют принципиальное отличие от потоков вещества. Если одни и те же питательные элементы, например, азот, могут использоваться экосистемой несколько раз, то потоки энергии всегда однонаправлены (Reichle et al., 1975). На турбулентные потоки тепла расходуется только та энергия, которая пришла от солнца, и она используется только один раз. Промежуточное положение занимают потоки воды: вода также может не сразу покидать экосистему, но обычно ее цикл довольно краток – либо она испаряется обратно в атмосферу, либо стекает в реки, следуя круговороту воды в природе.

Невязка теплового баланса в Кат Тьене ярко выраженного сезонного хода не имела, хотя и немного повышалась в начале сухого сезона и снижалась в самые сухие месяцы (Рисунок 1, а).

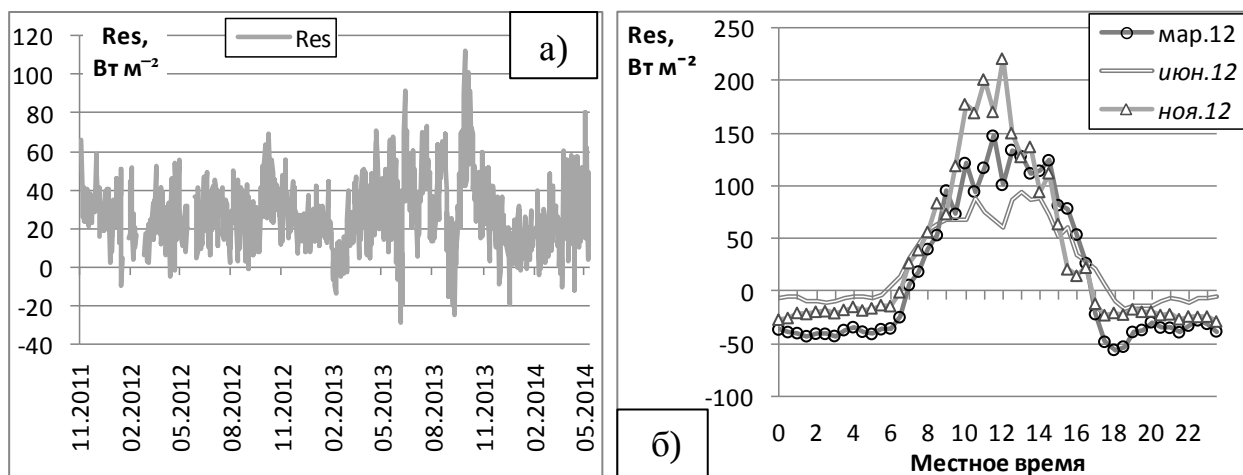


Рисунок 1 – Невязка теплового баланса (Res):

а) Сезонный ход;

б) Суточный ход во второй половине сухого сезона (мар.12), во влажный сезон (июн.12) и в начале сухого сезона (ноя.12)

В сухой сезон 2011-2012 гг. средняя невязка составляла 25.7 Вт м^{-2} , во влажный сезон 2012 г. – 26.1 Вт м^{-2} , в сухой сезон 2012-2013 гг. – 27.6 Вт м^{-2} , во влажный сезон 2013 г. – 37.1 Вт м^{-2} , в сухой сезон 2013-2014 гг. 16.6 Вт м^{-2} .

Закономерного хода невязки по сезонам не выявлено. Суточный ход невязки оказался довольно выраженным (Рисунок 1, б), с положительным максимумом днем и небольшими отрицательными значениями ночью, что совпадает с литературными данными (Wilson et al., 2002; Foken et al., 2008).

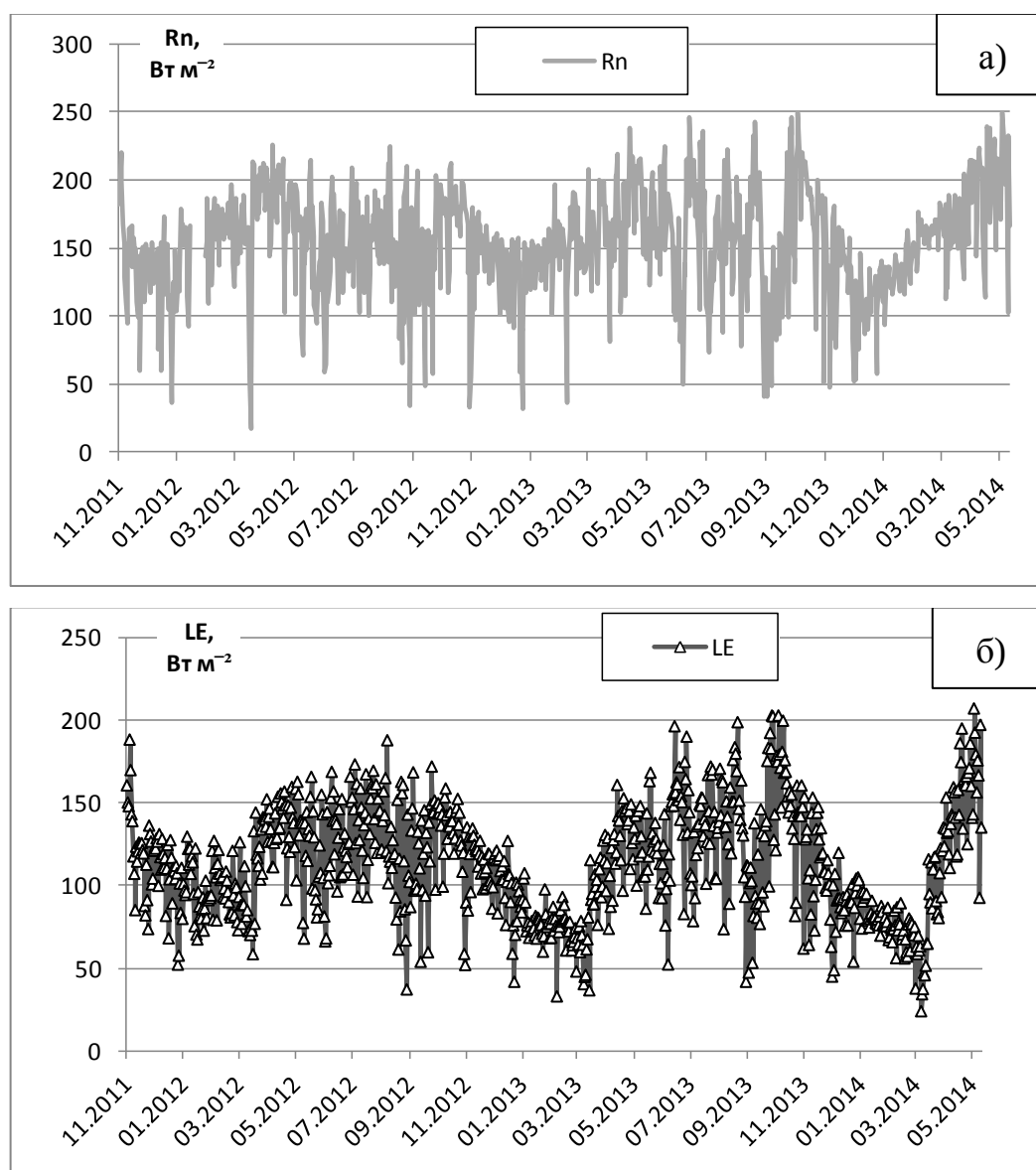
В среднем по месяцам невязка изменялась 0 до 31 % радиационного баланса. Годовое значение невязки за 2012 г. составило $794 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (при радиационном балансе $4829 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$). Иными словами, согласно измерениям, доступная энергия на 16.4 % превышала сумму всех измеренных расходных компонентов. Годовое значение невязки за 2013 г. составило $914 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (при радиационном балансе $4841 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$), т.е. доступная энергия была больше расходных компонент на 18.9 %.

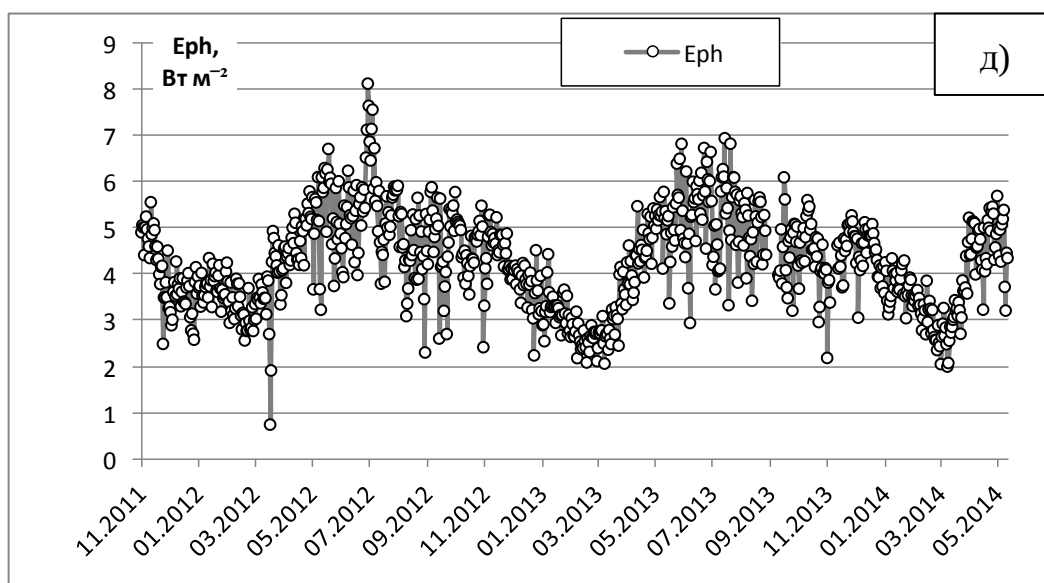
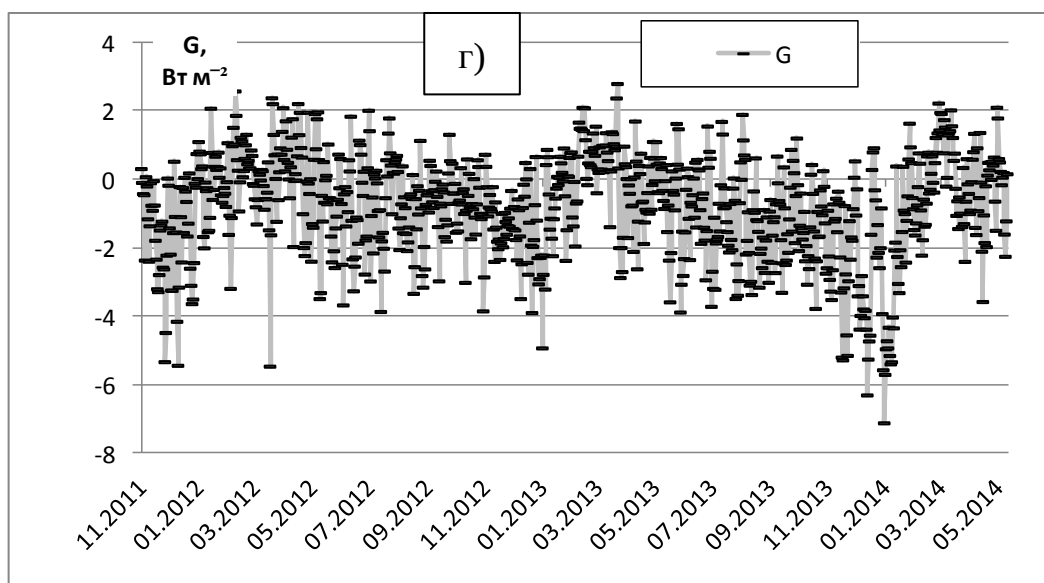
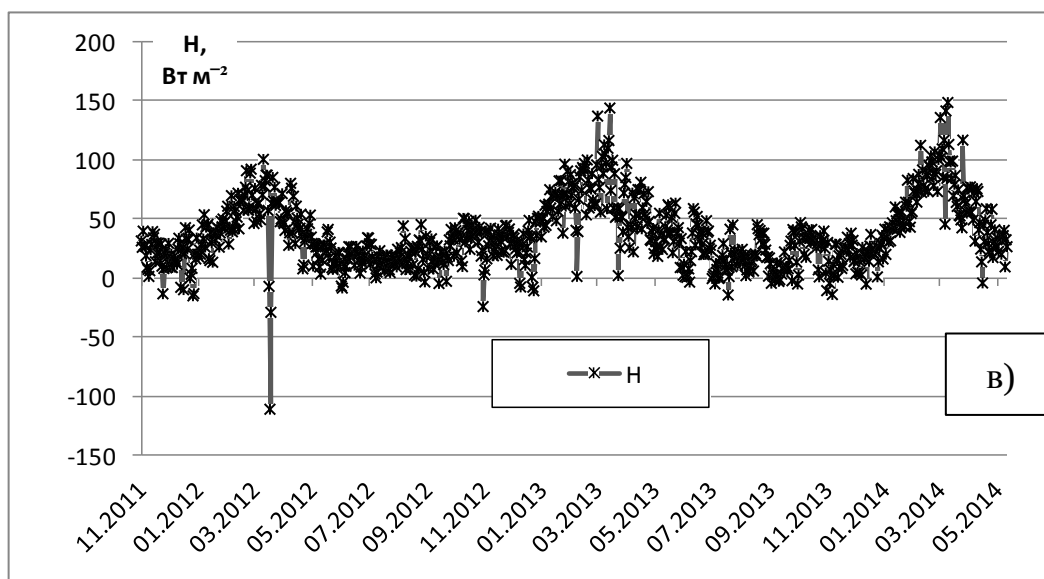
В сообществе FLUXNET к настоящему времени принято невязку перераспределять в турбулентные потоки тепла по ряду соображений (см. выше). Поэтому в данной работе величины явного (H) и скрытого (LE) тепла оценивались с учетом невязки, пропорционально распределенной по H и LE по отношению Боуэна H/LE (Eddy..., 2012). В данной работе коррекция суточных значений измеренных потоков производилась с помощью суточных невязок, коррекция среднемесячных измеренных потоков – с помощью среднемесячных невязок.

В целом за 2012 г. отношение Боуэна по потокам без поправки составило 0.26, за 2013 г. – 0.31. Добавочная величина невязки в 2012 г. ($790 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$) была распределена как $204 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ к первоначальной сумме H , составлявшей $804 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, и $586 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ к первоначальной сумме LE ($3110 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$). Аналогично, добавочная величина невязки за 2013 г. ($914 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$) была распределена как $647 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ к LE и $267 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ к H .

Сезонный ход составляющих теплового баланса показан на графиках (Рисунок 2); для всех составляющих показаны среднесуточные значения. Как уже говорилось (раздел 3.2), радиационный баланс в течение года зависел от высоты солнца и хода облачности. Максимальный радиационный баланс был зафиксирован во второй половине сухого сезона (апрель), когда солнце проходит

через зенит, а облачность пока еще невелика; вторичный максимум наблюдался в конце влажного сезона (октябрь) (Рисунок 2, а). В некоторые месяцы влажного сезона радиационный баланс значительно снижался из-за влияния облачности, однако в целом с апреля по сентябрь 2012 г. (влажный сезон) Rn составил 155.3 Вт м^{-2} , а в среднем за остальные месяцы 2012 г. (сухой сезон) Rn составил 150.1 Вт м^{-2} . Важной особенностью радиационного баланса Кат Тьена, не характерной (см. раздел 3.2) в общем для тропических экосистем, являлся тот факт, что в сухой сезон из-за снижения высоты солнца и усиления отрицательной длинноволновой компоненты радиационный баланс уменьшался еще значительно, чем во влажный сезон из-за повышенной облачности.





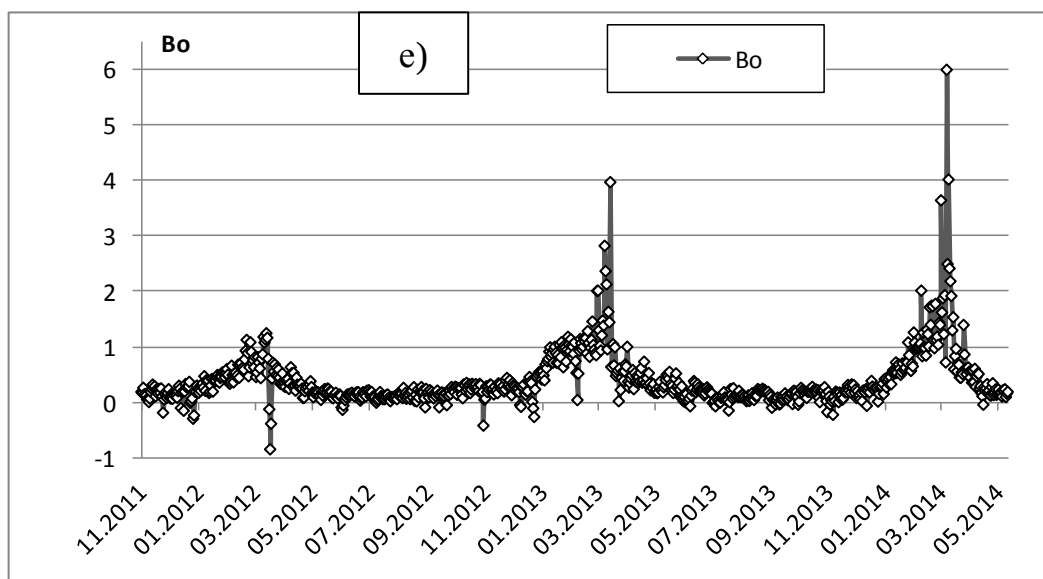


Рисунок 2 – Ход среднесуточных значений компонентов теплового баланса:

- а) Радиационного баланса (Rn);
- б) Турбулентного потока водяного пара (скрытое тепло) (LE);
- в) Турбулентного потока тепла в атмосферу (явное тепло) (H);
- г) Потока тепла в почву (G);
- д) Затрат тепла на фотосинтез (E_{ph});
- е) Отношения Боуэна ($Bo = H/LE$)

Сезонный ход затрат тепла на испарение (Рисунок 2, б) в целом повторяет сезонную динамику радиационного баланса (Рисунок 2, а) но во второй половине сухого сезона графики начинают расходиться: радиационный баланс увеличивается, а испарение продолжает сокращаться вследствие недостатка влаги. Если сравнивать суммы Rn и LE за месяц, то во все месяцы измерений на суммарное испарение тратилось больше половины радиационного баланса, за исключением самых сухих месяцев 2013 г. (февраля-марта) и 2014 г. (марта), когда среднемесячные LE/Rn опускались до 50 %, 44 % и 40 % соответственно.

Ход потока явного тепла имеет выраженный максимум в течение года – во второй половине сухого сезона (Рисунок 2, в). Если в начале сухого сезона по месячным суммам доля явного тепла в радиационном балансе не поднимается выше 20 %, то в январе H/Rn уже становится выше, а к февралю-марту поднимается до 40-50 %. Значит, в том случае, когда влага лимитирована, пришедшая солнечная радиация перераспределяется в турбулентный нагрев атмосферы.

Суточная сумма значений потока тепла в почву чрезвычайно низка, так как пришедшее за день тепло практически полностью отдается ночью (Рисунок 2, г). Тем не менее, в целом за сухой сезон почва накапливает тепло, а во влажный – отдает накопленное. Суточные средние значения G составляют от -6 до 3 Вт м^{-2} , что дает менее 2 % радиационного баланса; месячные значения дают, как правило, менее 1 % R_n .

Как и следовало ожидать, в среднесуточных и среднемесечных значениях изменения суммарных запасов тепла в почве (ΔE_s) и воздухе (ΔE_a) незначительны по сравнению с явным теплом: около $+0.08 \text{ Вт м}^{-2}$ в марте при среднем значении H за день 58 Вт м^{-2} и -0.12 Вт м^{-2} в июне при среднем значении H за день 13 Вт м^{-2} . Изменения запасов тепла в растительности (ΔE_p) в данной работе не рассчитывались в связи с отсутствием данных о температуре биомассы. ΔE_p может достигать значительных величин в течение дня (Wilson et al., 2002), что согласуется и с оценкой, приведенной ниже (при анализе суточного хода компонентов теплового баланса). Однако среднесуточные и среднемесечные величины ΔE_p также невелики по сравнению с явным теплом. Добавление ΔE_s и ΔE_a к уравнению теплового баланса в среднегодовых значениях не может снизить невязку теплового баланса, что согласуется с выводами Фокена (Foken, 2008).

В данной работе была проверена новая гипотеза о возможной причине годовой невязки теплового баланса вследствие еще одного неучтенного компонента – тепла, уходящего с нагретым стоком воды. Такая оценка, судя по известным литературным источникам, была сделана впервые. После дождей температура почвы значительно падала, особенно в самое жаркое время года. Следовательно, дождевая вода нагревалась и какое-то количество тепла выносила из экосистемы. Расчет показывает, что даже если бы весь уходящий за 2013 г. сток, т.е. 1033 мм ($=\text{кг м}^{-2}$) за год, нагревался на $5 \text{ }^\circ\text{C}$, то на этот нагрев было бы затрачено $21.6 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, что составляет 0.4 % от радиационного баланса. Обычно же изменение температуры дождевой влаги в почве меньше, чем $5 \text{ }^\circ\text{C}$. То есть, нагрев стока воды не объясняет невязки теплового баланса.

Сезонный ход затрат энергии на фотосинтез похож на сезонный ход испарения (Рисунок 2, д). E_{ph} увеличивались во влажный сезон и снижались в сухой сезон, причем во второй половине сухого сезона – продолжали снижаться при увеличении радиационного баланса. Средние суточные значения затрат энергии на фотосинтез составляют в основном от 2 до 6 Вт м⁻², т.е. от 2.0 до 3.8 % радиационного баланса.

Примечателен ход отношения Боуэна (явное тепло/скрытое тепло, т.е. $Bo = H/LE$) в сезонно-влажном климате (Рисунок 2, е). В пике сухого сезона отношение Боуэна резко возрастало. Если в сентябре по среднесуточным значениям $H/LE = 0.16$, к декабрю H/LE увеличивалось до 0.25, – то во второй половине относительно дождливого сухого сезона (2012 г.) составляло уже 0.63-0.70, а в конце относительно засушливых сухих сезонов (2013 и 2014 гг.) – больше 1-2 и даже до 6 в некоторые дни. Это означает, что турбулентный поток тепла на нагрев атмосферы был равен или даже больше энергии, затрачиваемой на суммарное испарение. При высокой влажности почвы максимальных значений достигало испарение, при низких – поток явного тепла (Рисунок 3). Поток явного тепла плавно возрастал при увеличении сухости почвы и температуры.

В целом, значительное увеличение H , отношения Боуэна и G происходило только в три сухих месяца в относительно влажный сухой сезон (с февраля по апрель 2012 г.) и четыре месяца в относительно засушливые сухие сезоны (с января по апрель 2013 и 2014 гг.). Ситуация с практически равными потоками явного и скрытого тепла вообще захватывала только 1-2 самых сухих месяца в году. Наибольший вклад во всплеск отношения Боуэна в марте-апреле создавал резкий рост турбулентного потока тепла в атмосферу за счет добавочной солнечной энергии.

Из этого следуют выводы:

а) все то время, пока хватало влаги, максимально возможная часть (а именно более 80 %) имеющегося тепла тратилось на испарение;

б) в самое сухое время года, когда количество влаги для испарения снижалось, пришедшее радиационное тепло перераспределялось в нагрев воздуха и почвы.

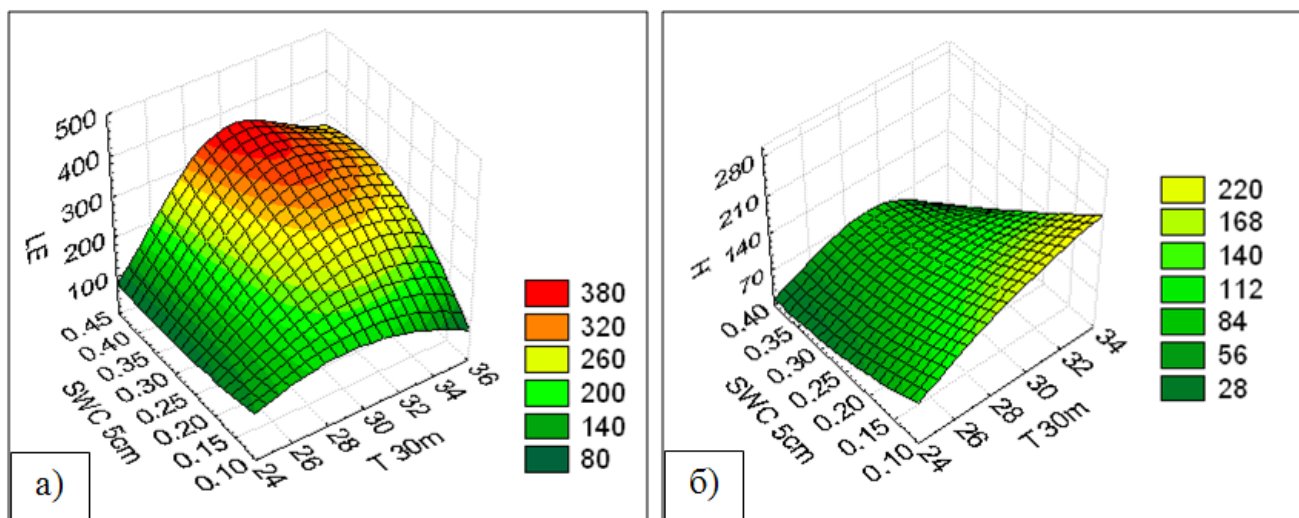


Рисунок 3 – Турбулентные потоки тепла днем (при суммарной радиации $>20 \text{ Вт м}^{-2}$) в Вт м^{-2} в зависимости от температуры на 30 м ($T 30m$) и влажности почвы на глубине 5 см в объемных долях ($SWC 5cm$), аппроксимация методом наименьших квадратов (графики построены по 30-минутным значениям потоков с флагами качества 1-3):

- а) Суммарное испарение, или поток скрытого тепла (LE);
- б) Поток явного тепла (H)

Пока влаги было достаточно, экосистема использовала приходящую энергию на совершение, в терминах термодинамического подхода, «полезной работы» (Сандлерский, 2013; Puzachenko et al., 2013) – работы по испарению и работы по созданию первичной продукции. В максимизации испарения в тех условиях, пока есть доступная влага, тропический лес сходен с таежным лесом умеренных широт (Сандлерский, 2013). Так как транспирация и фотосинтез являются единым энергетически взаимосвязанным процессом (Шульгин, 2009), при снижении транспирации снижался и фотосинтез. Иными словами, лимитирование фотосинтеза леса в Кат Тъене, как мы полагаем, осуществлялась только доступностью влаги для транспирации в том количестве, которое требовалось для охлаждения листьев.

В сухое время года, когда транспирация была ограничена сниженной влажностью почвы, лесная экосистема все равно испаряла значительное количество влаги, а оставшаяся энергия уходила в турбулентный нагрев атмосферы и повышение температуры воздуха, элементов растительности и почвы. Иными словами, энергия переходила в тепловую форму (нагрев сред), вместо того, чтобы перейти в энергию испарения.

Суточный ход радиационного баланса и основных составляющих теплового баланса – скрытого тепла, явного тепла и потока тепла в почву – показан на графике (Рисунок 4). График нуждается в некотором комментарии. Показан суточный ход по 30-минутным значениям, осредненным за месяц, для характерных месяцев; если в тексте далее сообщается о максимальных или минимальных значениях, то эти значения также представляют собой среднее значение за месяц за данный 30-минутный интервал (например, среднее по 30 значениям с 12:00 до 12:30 для каждого дня в сентябре).

Радиационный баланс возрастает довольно резко, имеет максимум от 500 Вт м^{-2} в пик влажного сезона до $670\text{-}730 \text{ Вт м}^{-2}$ в марте-апреле (Рисунок 4, а).

Суточный ход испарения, так же как и сезонный, во влажные месяцы очень тесно связан с ходом радиационного баланса; в месяцы сухого сезона испарение снижается и форма кривой отклоняется от колоколообразной кривой (Рисунок 4, б). В начале сухого сезона максимум испарения смещается на вторую половину дня, вслед за повышением дефицита водяного пара в воздухе. А в конце сухого сезона, при недостатке влаги, испарение имеет не очень высокий максимум в первой половине дня, а дальше LE ограничивается недостатком влаги и в течение дня снижается.

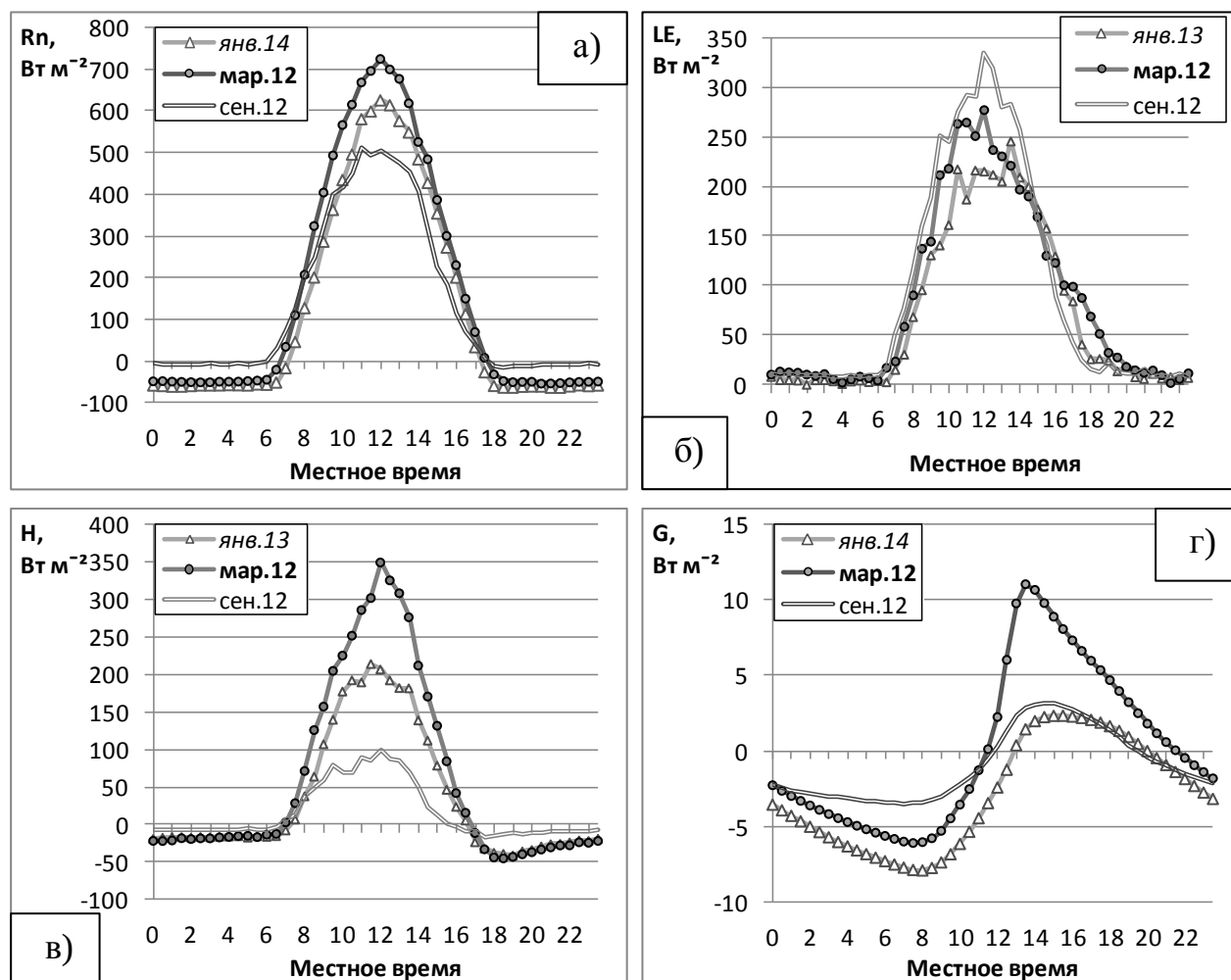


Рисунок 4 – Суточный ход компонентов теплового баланса в характерные периоды года: первую половину сухого сезона (январь 2013 и 2014 гг.), вторую половину сухого сезона (март 2012 г.) и пик влажного сезона (сентябрь 2012 г.):

а) Радиационного баланса (R_n);

б) Скрытого тепла (затрат тепла на испарение) (LE);

в) Явного тепла (затрат тепла на турбулентный теплообмен с атмосферой) (H);

г) Потока тепла в почву (G)

Потоки, связанные с нагревом отдельных сред (турбулентный поток тепла в атмосферу и поток тепла в почву) увеличивались в 3.5 раза в самое жаркое и сухое время года: максимальный средний за полчаса поток H доходил до 350 Вт м^{-2} (половина от радиационного баланса!), а G – до $7\text{-}11 \text{ Вт м}^{-2}$ (Рисунок 4, в, г). Среднее пиковое испарение снижалось не очень существенно – на 15-25 % от уровня влажного сезона.

В пике влажного сезона средний за месяц получасовой максимум LE составлял 78 % от среднего за месяц максимума R_n , максимум H – 25 % от

максимума Rn (с поправкой на невязку теплового баланса). На изменение запасов тепла в экосистеме в полуденные часы приходилось только 6 % от доступной энергии, на фотосинтез – 3 %, на поток тепла в почву – всего 1 %. Сумма процентов в данном случае не дает 100 %, так как максимумы наблюдались в разное время. В пике сухого сезона аналогичные доли выглядели как 49 % для LE , 54 % для H , 6 % для $Es+Ea$, 2 % для Eph и 1% для G . Таким образом, во второй половине сухого сезона происходило существенное перераспределение между потоками явного и скрытого тепла, а остальные потоки оставались небольшими и забирали в сумме 9-10 % полуденного максимума доступной энергии.

Если считать по среднемесячным максимумам 30-минутных потоков, в сентябре отношение Боуэна $H/LE=0.30$, а в марте – 1.06-1.46. Соотношение Боуэна по пиковым значениям оказывается существенно больше, чем по среднесуточным, так как испарение ночью колеблется около нуля, а поток тепла отрицателен, поэтому за сутки H заметно снижается.

Изменение запаса тепла в почве (не показанного на графиках, включенного в ход H) в суточном ходе достигает положительного максимума около 12 ч. Максимум островершинный, достигает $+30...+60 \text{ Вт м}^{-2}$ в самое жаркое время года и только $+15 \text{ Вт м}^{-2}$ в пик влажного сезона. Положительные значения сохраняются с 8 до 14 ч дня, остальное время почва постепенно отдает накопленное тепло.

Изменение запаса тепла в 50-м слое воздуха (не показанного на графиках, включенного в ход H) достигает положительного максимума около 8 ч утра. Максимум довольно размытый; положительные значения сохраняются с восхода солнца и до 14:30, дальше наступает охлаждение воздуха. В утреннем 8-ч максимуме изменение запаса достигает в среднем за месяц $+40 \text{ Вт м}^{-2}$ в марте и только $+15 \text{ Вт м}^{-2}$ в сентябре.

В целом, в полуденные часы изменение запаса тепла в почве составляет около 20 % от всего потока турбулентного тепла в атмосферу в сухие месяцы. Изменение запаса тепла в 50-метровом слое растительности в утренние часы обуславливает до 30 % явного тепла. Максимумы этих двух компонент расходятся, первый приходится на 12 ч дня, второй – на 8 ч утра. Поэтому общее

изменение запасов тепла в почве и воздухе составляет 20-30 % от потока явного тепла в первой половине дня. Следовательно, в суточном ходе эта величина существенна, и пренебрегать ей нельзя.

Масштаб величины изменения запаса тепла в растительности (ΔE_p) можно приблизительно оценить по имеющимся данным о биомассе. Для грубой оценки изменения теплосодержания экосистемы нужно знать количество сухой биомассы и воды (т.к. теплоемкость сухой фракции биомассы и воды в ней сильно различается) на единицу площади леса. Согласно измерениям и расчетам (Novichonok et al., 2012), количество углерода на гектар леса в районе измерительного комплекса составляло 400 тонн, а сухая биомасса – в 2 раза больше, т.е. 800 тонн, т.к. было принято, что сухая биомасса содержит 50 % углерода (Новичонок, 2013). В тропическом лесу Борнео среднее содержание воды по отношению к сухому весу было 0.45 (Suzuki, 1999). Если принять эту пропорцию и для Кат Тьена, количество воды в растениях составит 360 тонн на гектар, что равнозначно слою воды в 36 мм (36 кг м^{-2}). Допустим, что за 6 утренних часов, когда воздух на высоте 30 м нагревается на $6 \div 11 \text{ }^\circ\text{C}$, биомасса нагреется на $3 \text{ }^\circ\text{C}$. Затраты тепла, которые пойдут на нагрев 36 кг воды на $3 \text{ }^\circ\text{C}$ (при удельной теплоемкости воды $4187 \text{ Дж кг}^{-1} \text{ K}^{-1}$), составят 452000 Дж , распределенные на 6 часов – 21 Вт м^{-2} . Очень приблизительный расчет изменения теплосодержания сухой биомассы (считая ее удельную теплоемкость равной теплоемкости древесины, $1700 \text{ Дж кг}^{-1} \text{ K}^{-1}$) даст еще 408000 Дж , или 19 Вт м^{-2} . Таким образом, величина изменения запаса тепла в растительности в суточном ходе может составлять 40 Вт м^{-2} и сравнима с изменением запаса тепла в растительности и в почве.

В целом, изменения запаса тепла в экосистеме в Кат Тьене во влажный сезон близки к оценкам для влажного тропического леса Пасо (Малайзия) со схожей биомассой и средней высотой (Ohkubo et al., 2008). Однако изменения запаса тепла в лесу Кат Тьена в несколько раз увеличиваются в сухой сезон; по-видимому, в муссонном тропическом лесу в сухой сезон суточная динамика запасов тепла очень ярко выражена среди всех экосистем мира.

Выводы по разделу. Так как стандартными приборами сети FLUXNET все члены теплового баланса, значимые в сезонном ходе, измеряются, становится возможным посчитать невязку теплового баланса, которая оказывается характеристикой точности измерений турбулентных потоков. Не рассчитываемое изменение запаса тепла в растительности на сезонных и годовых значениях не может играть значительной роли. В Кат Тъене невязка за 2012 г. составила 16.3 %, за 2013 г. – 18.9 %, что немного меньше среднего по сети FLUXNET значения 20 %. По принятой методике (Foken et al., 2008; Eddy..., 2012) для дальнейшего анализа невязка была распределена между турбулентными потоками явного (H) и скрытого (LE) тепла по отношению Боуэна H/LE .

Приходный компонент теплового баланса – радиационный баланс (R_n) – в тропическом лесу Кат Тъена был значительным в течение года и в целом немного увеличивался во влажный сезон. Наибольшими расходными компонентами теплового баланса, на которые суммарно тратилось 97-98 % месячных сумм радиационного баланса, были затраты тепла на испарение (скрытый теплообмен) и затраты тепла на турбулентный нагрев атмосферы (явный теплообмен). Оставшиеся 2-3 % от R_n уходили на фотосинтез. 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.

В тех условиях, когда хватало влаги в почве, экосистема тропического леса из всех расходных компонентов теплового баланса максимизировала испарение, как происходило и в лесах Южной тайги Европейской части России (Сандлерский, 2013). На испарение уходило в благоприятных условиях более 80-85 % доступной энергии.

Во второй половине сухого сезона, когда испарение начинало лимитироваться снижением влажности почвы, приходящая солнечная энергия «была вынуждена» уходить на турбулентный нагрев атмосферы, так как экосистема не обладает возможностью запасаения энергии на более благоприятный период. Вместо совершения «полезной работы» в

термодинамических терминах (Сандлерский, 2013), т.е. работы по испарению и работы по созданию первичной продукции, энергия расходовалась на диссипацию в тепловой форме⁸. В самые засушливые месяцы до половины пришедшей энергии переходило в тепловую форму. Согласно второму закону термодинамики, при переходе энергии из радиационной формы в другие, «полезные для экосистемы» формы (скрытого тепла и в химическую форму органических соединений), какая-то часть неизбежно должна теряться в виде тепловой энергии. Пока доступна влага для испарения, лесная экосистема минимизирует переход энергии в тепловую форму; с увеличением засушливости снижаются возможности по транспирации и фотосинтезу, и энергия вынужденно «теряется», создавая фон высокой температуры воздуха. Оказывается, что наличие влаги в грунте и сохранение листьев у вечнозеленых деревьев нижних подъярусов обеспечивает относительную стабильность потока испарения (все же, несмотря на длительное отсутствие осадков, половина пришедшей энергии даже в самые засушливые месяцы тратится именно на испарение) и удерживает пришедшую солнечную энергию от рассеяния в тепловой форме, а температуру воздуха – от экстремальных значений.

В высокоствольном тропическом лесу запас тепла в экосистеме максимален среди других экосистем мира (Dou et al., 2006). В Кат Тьене изменения запаса тепла в экосистеме в суточном ходе значительны по сравнению с остальными членами теплового баланса (в полуденные часы сухого сезона они составляют 9 % от доступной энергии и 30-45 % от потока явного тепла). Во все месяцы полуденные изменения запаса в экосистеме оказались больше, чем поток тепла в почву и затраты энергии на фотосинтез. Следовательно, в суточном ходе изменения теплозапаса экосистемы значительны и должны учитываться наряду с остальными членами теплового баланса. Изменения теплосодержания муссонного тропического леса в сухой сезон в несколько раз больше, чем во влажный сезон.

⁸ Транспирация считается полезной работой, так как связана с фотосинтезом и в каком-то смысле «обеспечивает» протекание фотосинтеза. Как показано в главе Водный баланс, транспирация в Кат Тьене составляла более 80 % от суммарного испарения

4.2. Вертикальные потоки влаги

Наземная экосистема получает влагу атмосферных осадков, часть которой она возвращает в атмосферу (суммарное испарение), а оставшуюся часть отдает в реки, озера и подземные воды (сток); в течение года изменяется запас влаги в почве и количество влаги в растениях. Комплекс пульсационных и метеорологических измерений в сочетании с измерениями осадков под пологом леса и просачивания влаги в почву позволяет прямо оценить вертикальные потоки влаги над экосистемой (осадки, суммарное испарение), их компоненты (в том числе конденсацию, перехват осадков лесным пологом), изменения влагозапаса почвы и количество влаги, уходящей в грунтовые воды. Годовые суммы, сезонная и суточная динамика, а также взаимосвязи этих параметров между собой и с другими условиями среды будут рассмотрены в данной главе.

Общие замечания. Уравнение водного баланса экосистемы включает три основных компонента: **осадки Pr** (приходный член), **суммарное испарение E** и **сток R** (расходные члены); помимо этого, изменяется **запас влаги** в экосистеме S_{H_2O} (по (Братсерт, 1985)):

$$Pr = E + R + \Delta S_{H_2O} \quad (3)$$

Принято компоненты водного баланса измерять в мм м^{-2} (слой выпавшей/испарившейся/стекшей воды на единицу поверхности земли). Если для сравнения с потоками энергии (например, с радиационным балансом) требуется вычислить энергию, затраченную на испарение данного объема воды (скрытое тепло), то величину испарения в мм домножают на теплоту парообразования воды L . L меняется в зависимости от температуры испаряемой воды. При 26°C – средней температуре в пологе леса в Кат Тьене за период наблюдений – $L=2420000 \text{ Дж кг}^{-1}$. Аналогично, разделив величину радиационного баланса на скрытую теплоту парообразования, можно рассчитать, сколько мм слоя воды могло бы испариться с затратой данного количества энергии (что иногда делается

в гидрологических расчетах; в данной работе эта операция также проведена для сравнения величин доступной энергии и скрытого тепла – см. Рисунок 5, б).

Экосистемы экваториального и субэкваториального пояса относительно других экосистем мира обеспечены не только большим количеством тепла, но и большим количеством осадков. Средняя годовая сумма осадков на суше в приэкваториальных районах составляет 1700-3000 мм (иначе, слой выпадающих осадков достигает 1.7-3.0 метра в год). Для сравнения, в центральной полосе России годовая сумма осадков составляет 600-700 мм, а за вегетационный период – всего около 400 мм, или 40 см.

60-75 % поступившей с осадками влаги тропическая лесная экосистема отправляет обратно в атмосферу (Mahe, Servat, Maley, 2004) через **физическое испарение** (не-биологическое испарение воды с поверхности почвы и наземных частей растений) и **транспирацию** (испарение влаги через устьица растений). Сумма физического испарения и транспирации называется **суммарным испарением**, или **эвапотранспирацией (E)**. В общем случае суммарное испарение есть функция от количества доступной влаги (осадков и грунтовых запасов), от количества доступной энергии (радиационного баланса), их соотношения, а также от свойств испаряющей поверхности. К последним относится, в частности, площадь испаряющей поверхности, которая в лесных экосистемах в основном определяется суммарной площадью листовых пластинок на единицу поверхности земли (и, как правило, в лесу на 1 квадратный метр земной поверхности приходится несколько кв. метров испаряющей поверхности).

Тропические леса дают на 10-25% более высокое испарение и низкий сток относительно безлесных территорий при одной и той же величине осадков и радиационного баланса (Wohl et al., 2012). Количество воды, которое лесная экосистема «перекачивает» из почвы в атмосферу, значительно больше потребности растений для обеспечения их растворенными в почвенной влаге микроэлементами. Интенсивная транспирация вызвана развитием большой листовой поверхности для максимального поглощения CO₂ и солнечной радиации

в условиях необходимости охлаждения этой поверхности и сухости⁹ атмосферного воздуха (Медведев, 2004; Веретенников, 2006; Osborne, Sack, 2012). Большая листовая поверхность требуется для интенсификации фотосинтеза, но при этом теряется много воды (по С.С. Медведеву: «противоречие между голодом и жаждой»). При недостатке влаги растение быстро начинает страдать от обезвоживания. Поэтому К.А. Тимирязев назвал транспирацию в том объеме, в котором она фактически осуществляется, «неизбежным злом» (Тимирязев, 1957). Физическое испарение в лесной экосистеме также больше, чем в безлесной – в частности, за счет осадков, остающихся после дождя на листьях и ветвях и испаряющихся обратно в атмосферу, не дойдя до почвы. Эта величина называется **перехватом Int** и может составлять 15-40 % от выпавших осадков (Mahe, Servat, Maley, 2004).

Сток воды R в грунтовые воды, реки и водохранилища определяет запасы влаги, доступные для ирригации и гидроэнергетики. По пульсационным измерениям сток можно оценить только косвенно, как остаточный член уравнения водного баланса: вычитая из осадков испарение и изменение запасов влаги в экосистеме. Расчет годовой величины стока будет приведен в данной главе, однако месячные величины по используемым данным рассчитать невозможно, т.к. необходимо учитывать горизонтальные и вертикальные потоки влаги в почве на больших территориях. Для этого учета требуются дополнительная сеть измерений в сочетании с моделированием. Акцент в главе сделан на вертикальных потоках влаги, которые измеряются прямым способом.

Запас влаги в экосистеме S_{H_2O} можно разбить на две части – **в растительности $S_{H_2O_plant}$** и **в почве $S_{H_2O_soil}$** . Среднемноголетнее изменение запаса влаги в стационарной экосистеме при постоянстве внешних условий приближается к нулю, однако в отдельные периоды (сухой сезон-влажный сезон, годы Эль-Ниньо/годы Ла-Нинья) запас влаги в почве и стволах деревьев может сильно меняться.

⁹ Имеется в виду, что в устьичных порах относительная влажность достигает 100 %, а в атмосферном воздухе относительная влажность даже в экваториальной зоне днем снижается до 60-80 %.

Сезонный ход составляющих водного баланса. Приходная часть водного баланса, т.е. атмосферные осадки, в муссонном климате испытывает яркий сезонный ход, как было показано в разделе 3.1 (Рисунок 1, а). В пике влажного сезона (в среднем – август-сентябрь) осадков выпадает столько, что обширные лесные пространства затапливаются водой. Норма осадков в Кат Тьене для одного месяца – сентября (442 мм) – близка к норме осадков в Центральной России за весь теплый период года. В пике сухого сезона (в среднем – февраль-март) после нескольких месяцев без дождей почва в лесу иссушается настолько, что покрывается трещинами, уровень крупных озер и рек падает на 4-6 метров, почти все лесные ручьи и речки пересыхают (The nomination..., 2007; Структура и функции..., 2011).

По контрасту с ходом осадков, ход солнечной радиации в течение года довольно плавный (раздел 3.2, Рисунок 1). Во второй половине сухого сезона, т.е. в самое жаркое время, лес получает даже повышенное (на 20-30 % относительно средних суточных значений за весь год) количество солнечной, и в том числе фотосинтетически активной, радиации. Чтобы использовать этот период для фотосинтеза, растения должны эффективно охлаждать листовую поверхность и вынуждены поддерживать транспирацию на максимально возможном уровне.

Измерения по пульсационному методу показывают, что испарение, действительно, в течение сухого сезона снижалось в среднем всего на 20 % по сравнению с влажным сезоном (Рисунок 5, а – месячные значения, б – суточные значения).

Удивителен факт, что лес поддерживал испарение на уровне $80-110 \text{ мм мес}^{-1}$ ($2.9-3.6 \text{ мм сут}^{-1}$) даже в те месяцы сухого сезона, когда сумма осадков составляла $3-4 \text{ мм мес}^{-1}$. Во влажный сезон же, когда сумма осадков составляла $300-600 \text{ мм мес}^{-1}$, испарение оставалось на уровне всего $120-140 \text{ мм мес}^{-1}$ ($4-5 \text{ мм сут}^{-1}$).

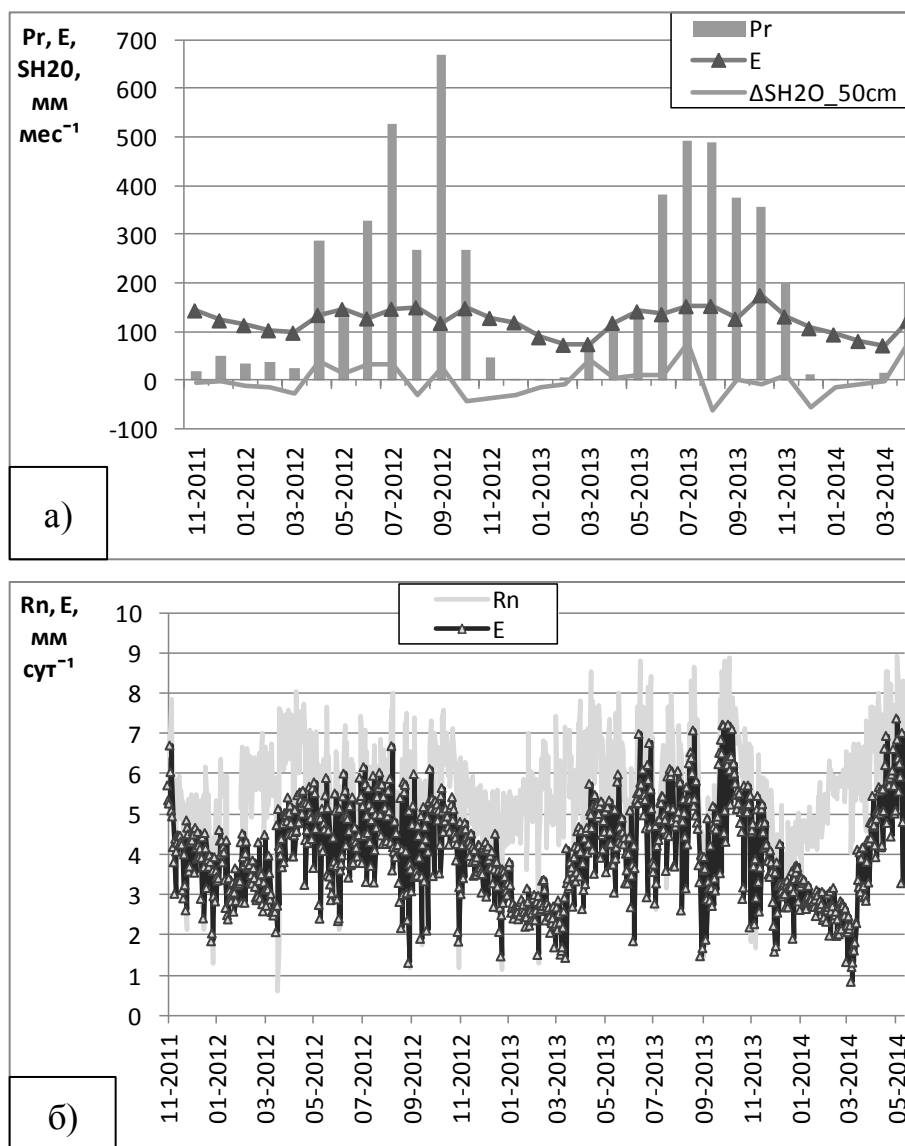


Рисунок 5 – Компоненты водного баланса:

- а) Месячная сумма осадков (Pr), испарения (E) и изменения влагосодержания почвы до глубины 50 см (ΔSH_{2O_50cm});
 б) Суточная сумма испарения (E), а также радиационного баланса (Rn), выраженного в мм слоя воды

Ключ к вопросу о «постоянстве» испарения дает график (Рисунок 5, б). В течение всего года суточные суммы испарения значимо (здесь и далее в главе коэффициенты корреляции рассчитаны при уровне значимости $\alpha=0.05$) коррелировали с суточными суммами радиационного баланса: в 2012 г. коэффициент корреляции $r=0.82$ (значение коэффициента детерминации среднесуточных значений $r^2=0.68$). Когда из обоих рядов был удален сезонный ход (30-дневное скользящее среднее), коэффициент корреляции составил 0.84

($r^2=0.71$). В 2013 г. для LE и Rn $r=0.69$, после удаления трендов – 0.78. Недостаток осадков во второй половине сухого сезона выражается только в небольшом снижении корреляции испарения с радиационным балансом. Во влажный сезон и в начале сухого сезона $r=0.8-0.9$, а в конце сухого сезона r снижается до 0.6-0.7 (Рисунок 6, а). Таким образом, ключевое объяснение плавного сезонного хода LE состоит в преимущественной связи с радиационным балансом, т.е. количеством доступной энергии – радиационный баланс также имеет плавный сезонный ход. Атмосферное увлажнение весь год, кроме 1-2 месяцев, не влияет на суммарное испарение.

Затраты тепла на испарение LE в течение года составляли 71% от радиационного баланса Rn , т.е. от общей энергии, доступной для испарения. Доля месячных сумм LE в Rn была минимальной – 40-49 % – в пике сухого сезона 2013 и 2014 г., максимальной – 86-88 % – в пике влажного сезона 2012 и 2013 года.

Таким образом, в самое дождливое время прослеживалась тесная связь испарения с радиационным балансом, а на испарение уходило до 4/5 доступной энергии. Напротив, в самое засушливое и жаркое время года корреляция испарения с радиационным балансом снижалась, и на испарение уходило менее половины поступившей энергии (Рисунок 5, б). Тем не менее, величина испарения в сухое полугодие относительно влажного полугодия снижалась всего на 20 %. Испарение в два месяца с самым низким испарением составило 50 % от значения за два месяца с самым высоким испарением, как в 2012-2013, так и в 2013-2014 годах.

Работу экосистемы по испарению можно оценить путем сравнения с испаряемостью – максимально возможным испарением с открытой водной поверхности при данных условиях. Требуется подчеркнуть, что испаряемость не равна радиационному балансу, выраженному в единицах слоя влаги (т.е. испаряемость не равна количеству влаги, испарившейся на всю доступную энергию). Испаряемость лимитирована площадью поверхности, с которой испаряется влага; скоростью испарения, зависящей от влажности воздуха, температуры и скорости ветра. Площадь испаряющей поверхности в лесу в

основном задается листовым индексом – площадью листьев на единицу площади поверхности. Листовой индекс в лесах может достигать $4-6 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$, т.е. на каждый квадратный метр поверхности приходится 4-6 квадратных метра листьев. К примеру, в муссонном лесу Кат Тьена во влажный сезон листовой индекс составляет $5.1 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$. Поэтому экосистема может испарять больше, чем водная поверхность, в которой на квадратный метр площади приходится только один метр испаряющей поверхности.

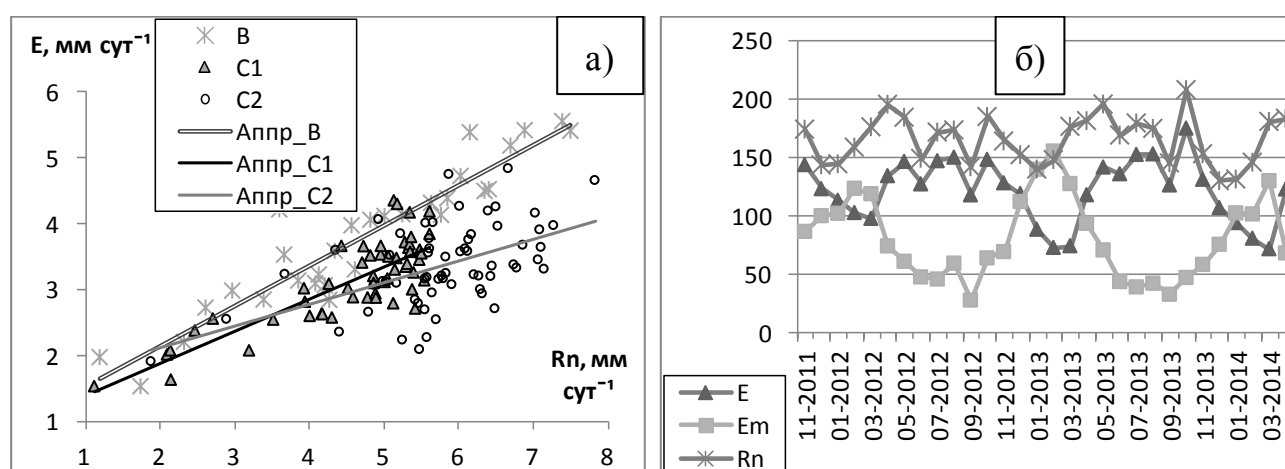


Рисунок 6 – Фактические и расчетные потоки влаги:

- а) Регрессия суточных сумм испарения E и радиационного баланса Rn (выраженного в мм сут^{-1}) в пик влажного сезона В (сентябрь 2012 г.), первой половине сухого сезона С1 (декабрь 2011 и январь 2013) и второй половине сухого сезона С2 (март 2012 и апрель 2013);
- б) Испарение E , испаряемость Em (по формуле Н.Н. Иванова) в мм мес^{-1} и радиационный баланс Rn , выраженный в мм мес^{-1}

Испаряемость за месяц, согласно используемой в отечественной литературе формуле Н.Н. Иванова (Иванов, 1948), вычисляется по средней месячной температуре t ($^{\circ}\text{C}$) и относительной влажности f (%), уравнению (4). Если среднесуточная температура превышает 26°C , то первый коэффициент понижают, согласно Л.А. Молчанову, на 0.8, уравнение (5):

$$Em = 0.0018 (25 + t)^2 (100 - f) \quad (4)$$

$$Em = 0.00144 (25 + t)^2 (100 - f) \quad (5)$$

Расчетная испаряемость E_m превышала измеренное испарение E только в самые сухие периоды 2012 и 2013 годов (Рисунок 6, б).

За 4 месяца сухого сезона 2012-2013 гг. с водной поверхности могло бы испариться на 170 мм больше влаги, чем из леса. Весь влажный сезон, напротив, испарение леса в 2-2.5 раза превышало испаряемость. За апрель-ноябрь 2013 г. лес испарил на 550 мм больше влаги, чем испарилось бы с водной поверхности при тех же условиях. Итого, за год (04.2012-03.2013¹⁰) в экосистеме муссонного тропического леса испарение почти на 50 % (476 мм) превысило испаряемость с открытой водной поверхности (при общей сумме для водной поверхности $E=976$ мм, для леса – $E=1454$ мм). За следующий год (04.2013-03.2014) испарение превысило испаряемость на $\frac{3}{4}$ (сумма для водной поверхности 835 мм, для леса 1487 мм). Это свидетельствует о весьма активной роли тропических растений в формировании испарения.

Обсуждение формирования высокого испарения в сухой сезон в отсутствие осадков. Теоретически, вероятны три пути восполнения влаги для деревьев:

- 1) круглогодичный доступ корней к постоянным грунтовым водам;
- 2) восполнение влаги из почвы и нижележащих слоев грунта, по мере того как верхние горизонты осушаются;
- 3) расход влаги, запасенной в проводящих тканях деревьев.

Для леса в Кат Тьене на водораздельных территориях (не приречного), существование грунтовых вод, доступных для корней деревьев, находится под сомнением в связи с двумя аргументами. Первый аргумент заключается в том, что в течение сухого сезона уровень основных водосборов, а значит, и грунтовых вод, падает на 4-6 м (The nomination..., 2007); полностью пересыхает ручей в 500 м от точки измерений, русло которого ниже на несколько метров, чем поверхность

¹⁰ Границы года выбраны так, чтобы полностью захватить влажный сезон 2012 г. и засушливый сухой сезон 2012-2013 гг., т.е. чтобы оценить роль лесной экосистемы в формировании испарения при менее благоприятных для нее условиях.

земли у точки измерений. В принципе, даже если уровень грунтовых вод в Кат Тьене падает на 4-6 м, возможно, что корни деревьев проникают до этой глубины, несмотря на чрезвычайно каменистую почву. Так, корни диптерокарпов в лесу Ма Да проникают в почву до глубин 3-5 м, максимально до 7 м (Кузнецов, 2003). С другой стороны, нужно принимать во внимание, что вечнозеленые деревья, транспирирующие в сухой сезон – это деревья нижних-средних подъярусов, имеющих, как правило, высоту менее 15 м. Данных о глубинах корневых систем таких деревьев нет, но, наверное, корни этих деревьев проникают на меньшую глубину, чем корни высоких деревьев. Второй аргумент заключается в том, что в Кат Тьене в самую сухую часть года испарение все-таки снижается и корреляция с радиационным балансом уменьшается, в то время как в полулистопадном лесу Синоп в Амазонии, корни деревьев в котором имеют доступ к постоянным грунтовым водам, суммарное испарение в течение всего года вообще не зависело от атмосферных осадков, а зависело только от радиационного баланса (Vourlitis et al., 2008).

Второй путь весьма вероятен. По мере иссушения верхних горизонтов почвы влагу могут отдавать более глубокие горизонты. Для леса Ма Да на глубоких (180-220 см) латеритных почвах на сланцах А.Н. Кузнецовым (Кузнецов, 2003) предложено именно второе объяснение. В Кат Тьене материнская порода отличается от парка Ма Да: в 8 из 9 почвенных разрезов на расстоянии до 50 м от измерительного комплекса мощность почвы не превышала 0.8-1 м, а дальше начинался слой базальта, глыбы которого перемежались с крошеной породой.

Для выяснения, насколько вероятен путь восполнения влаги № 2, были рассчитаны возможные влагозапасы почвы. Требуется учитывать, что влага почвы расходуется не только на испарение, но и на сток (через грунтовые воды). Т.е. на испарение будет тратиться меньше расчетной величины $S_{H_2O_soil}$, при этом различие особенно велико в начале сухого сезона, пока почва еще влажная.

В отсутствие осадков объемная влажность почвы снижается сначала резко, затем более плавно (Рисунок 7, а, периоды 11.2012-03.2013 и 11.2013-03.2014).

Общий вид кривых изменения влагозапасов почвы в верхних 50 см в сухой сезон без дождей был близок к логарифмическому (Рисунок 7, б, в, $SH2O_{0.5m}$) и хорошо ($r^2=0.95$ и 0.93) аппроксимировался уравнениями

$$\begin{cases} \Delta SH2O_{0.5m} = 0.5995 \cdot \ln(N) - 3.0011 & (2012-2013 \text{ гг.}) \\ \Delta SH2O_{0.5m} = 1.0498 \cdot \ln(N) - 4.8529 & (2013-2014 \text{ гг.}), \end{cases} \quad (6)$$

где N – номер дня от начала периода без дождей.

Если предположить, что влажность на глубинах 50-100 см снижается так же, как в слое 30-50 см (вид кривой иссушения аналогичен), то уравнение за сухой сезон 2012-2013 гг. для глубин до метра приобретет коэффициенты

$$\Delta SH2O_{1m} = 1.199 \cdot \ln(N) - 6.0022. \quad (7)$$

Изменение влагозапасов почвы до глубины 50 см (максимальная глубина установки датчиков) могло давать до 26-27 % испарения в начале сухого сезона, но к концу сухого сезона 2012-2013 гг. роль $S_{H2O_{50cm}}$ в поставке влаги снизилась до 11 % (Рисунок 7, б). Тогда же влажность верхнего 5-см слоя снизилась до критической отметки в 10 % по объему (об.), близкой к влажности завядания по литературным данным для суглинистых почв (Руднев, 2003), хотя на глубинах 30-50 см влажность оставалась на уровне 15-16 % об. (Рисунок 7, а).

Расчеты по формуле (7) показывают, что в самом в начале сухого сезона изменение влагозапасов почвы до глубины 1 метр может составлять до $5-6 \text{ мм м}^2 \text{ сут}^{-1}$, но к концу сухого сезона будет составлять только $0.3 \text{ мм м}^2 \text{ сут}^{-1}$, что, естественно, не покрывает расходов на испарение – в среднем $2.9 \text{ мм м}^2 \text{ сут}^{-1}$.

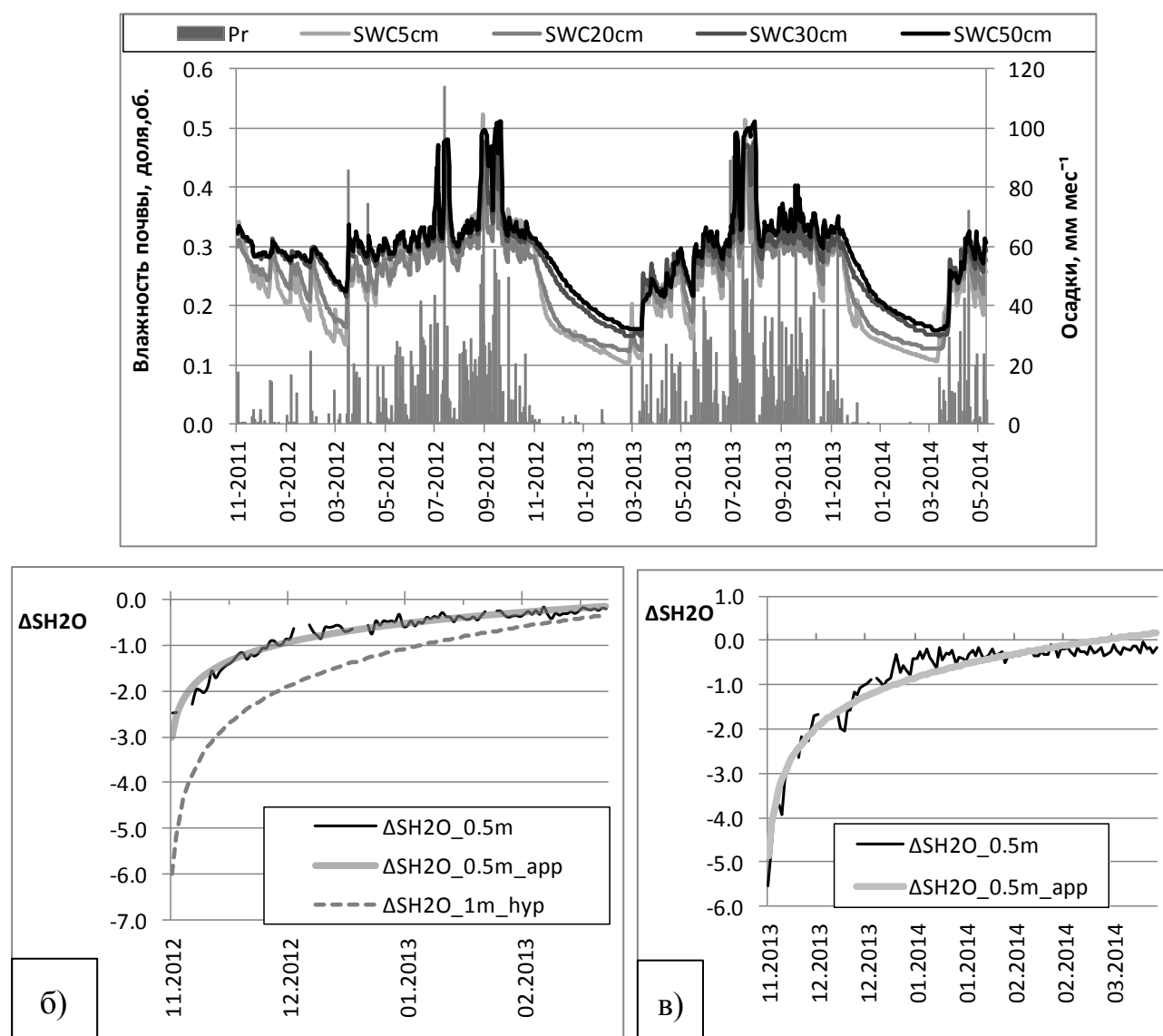


Рисунок 7 – Изменение влажности и влагозапасов почвы:

а) Объемная влажность почвы (Soil Water Content) на глубинах 5, 20, 30, 50 см (соответственно *SWC5cm*, *SWC20cm*, *SWC30cm*, *SWC50cm*) и суточная сумма осадков (*Pr*, показаны столбиками);

б) Изменение влагозапасов почвы в слое до глубины 50 см ($\Delta SH2O_{0.5m}$) за сухой сезон 2012-2013 гг. и аппроксимация влагозапасов логарифмической функцией ($\Delta SH2O_{0.5m_app}$); гипотетическое изменение влагозапасов до глубины 1 м ($\Delta SH2O_{1m_hyp}$, показано пунктиром) – см. пояснение в тексте;

в) Изменение влагозапасов почвы в слое до глубины 50 см ($\Delta SH2O_{0.5m}$) за сухой сезон 2013-2014 гг. и аппроксимация влагозапасов логарифмической функцией ($\Delta SH2O_{0.5m_app}$)

Однако предположение, на котором основана формула (7), может быть неверным, если на глубинах более 50 см влагоудерживающие свойства грунта меняются, особенно при наличии водоупорного слоя. Влажность почвы над водоупором будет выше расчетной. Толщи материнской породы могут служить

«резервуаром», где скапливается вода с влажного сезона, и эти «резервуары» могут подпитывать влагой почву вокруг. Для проверки данных предположений требуются результаты бурений грунта, что достаточно трудоемко. Тем не менее, можно оценить примерное количество влаги, которое поступает на глубины более 50 см в течение влажного сезона – с помощью лизиметров (см. раздел 2.2). Точное количество влаги, оставшейся в почве после влажного сезона, вычислить невозможно, т.к. неизвестен грунтовый боковой сток. Однако можно сделать «оценку сверху» для слоя почвы определенной толщины, т.е., к примеру, оценить максимальное количество влаги, которое может накопиться 1-м слое почвы.

Данные лизиметров показывают, что во влажный сезон 2012 г. уровень грунтовых вод дважды поднимался выше 50 см, причем второй раз – в самом конце влажного сезона, в октябре. Значит, к концу влажного сезона почва была до предела насыщена влагой. Когда почва полностью наполнялась влагой (максимальная влагоемкость), влажность в горизонте 40-50 см поднималась до 48.1 % по объему (для разных горизонтов в зависимости от механических свойств 45.7-51.3 %об.) и оставалась на этом значении, пока зеркало грунтовых вод не понижалось. Значит, во время затопления бессточные понижения в материнской породе могут аккумулировать около 481 мм воды на каждый метр глубины, что позволило бы деревьям 5 месяцев поддерживать испарение на уровне 90-100 мм мес⁻¹. Однако, нужно принимать во внимание, что какая-то часть влаги может уходить в подземные воды и поддерживать сток. При большей толщине почвы на некоторых территориях, т.е. в более глубоких понижениях базальта или на участках сильно выветрелой материнской породы, куда вполне достают корни деревьев, могло накапливаться и больше воды. Порядок величин сходен с порядком величины суммарного испарения за сухой сезон: влаги, накопленной в грунте, хватило бы экосистеме на сухой сезон. Поэтому вторая гипотеза о восполнении влаги в сухой сезон из резервуаров в грунте, как и первая (о поступлении влаги из постоянных грунтовых вод), может быть верной.

Вероятность возможности № 3, или запасаения влаги в проводящих тканях деревьев, можно оценить сверху по уже сделанной оценке влагосодержания

биомассы, около 36 мм м^{-2} (раздел 4.1). Вся вода из биомассы испарилась бы за 2 недели (при суммарном испарении в самые сухие месяцы около 70 мм мес^{-1}). Очевидно, что вода из проводящих тканей деревьев в лесу Кат Тьен может давать только очень слабую прибавку к транспирации, а основной источник воды для испарения иной. Вода из ветвей составляла 9-15 % суточной транспирации для пяти видов деревьев в тропическом сезонно-влажном лесу Панамы (Goldstein et al., 1998); однако, эта оценка была сделана в относительно дождливый сухой сезон – с превышением количества осадков над нормой в 2.5 раза. Голдштейн делает вывод, что основная масса воды для транспирации поступает все-таки из почвы, однако добавочная влага из ветвей позволяет деревьям сохранять устья открытыми дольше (Goldstein et al., 1998). В Кат Тьене количество транспирируемой воды из тканей деревьев, по-видимому, играет малую роль; для точной оценки количества влаги, запасаемой в проводящей ткани деревьев, требуются дополнительные исследования плотности и влажности древесины.

В аналогичном контексте формирование относительно высокого испарения тропического леса KM83 в Сантареме, Бразилия, в сухой сезон обсуждалось в работе (da Rocha et al., 2004). Да Роча отмечает, что в суточном ходе влажность верхнего слоя почвы в периоды без дождей снижалась днем и частично восполнялась ночью. Да Роча с соавторами объясняет выявленный ход влажности ночным перераспределением воды между слоями почвы посредством двух механизмов – гидравлического лифта или подъема влаги по капиллярам почвы. Оба механизма работают, когда между горизонтами почвы создаются большие градиенты влажности. Гидравлический лифт – механизм, при котором корневые системы оказываются трубками с низким сопротивлением для потока влаги между влажными и сухими горизонтами почвы (Caldwell et al., 1998). Так как в Кат Тьене был зафиксирован такой же ход влажности почвы, как в KM83, вполне возможно, что в Кат Тьене действуют те же механизмы гидравлического лифта и движения воды по капиллярам почвы, обеспечивающие подъем влаги из горизонтов глубже 1 м к поверхности (почву до глубины 1 м можно считать относительно однородной и довольно сухой). Измерения влажности грунта на

глубинах 0-10 м в Амазонии (станция КМ83) в 2002-2003 гг. показали, что при отсутствии постоянных грунтовых вод влага для испарения может поступать с глубин не менее чем 10 м (Bruno et al., 2006).

Мы полагаем, что возможность сохранения высокой транспирации в сухой сезон у сезонно-влажных тропических лесов определяется соотношением гидрогеологических характеристик грунтов и глубин корневых систем деревьев, а также величиной годовой суммы осадков. Это мнение частично совпадает с мнением Борчерта (Borchert, 1994), изучавшего фенологические изменения в сезонно-влажном тропическом лесу Коста-Рики. Борчерт полагает, что фенологические процессы и географическое распределение сезонно-влажных тропических лесов определяются запасами влаги в грунтах и в стволах деревьев. Танака (Tanaka et al., 2008, ch. 3.1) в числе лимитирующих факторов для циклов влаги и энергии тропических муссонных лесов перечисляет структуру древостоя (высоту и количество деревьев на гектар), фенологические характеристики (общую листопадность и ход листового индекса), физиологические характеристики (устыичную лимитацию) и свойства почв (в т.ч. гидрогеологические характеристики). Можно выдвинуть гипотезу, что в первичном сезонно-влажном тропическом лесу именно гидрогеологические свойства грунтов (относительно консервативная характеристика) будут определять и структуру, и фенологию экосистемы, и, как следствие – энерго- и массообмен.

В сухой сезон доступ корней к грунтовым водам либо воде, запасенной с сезона дождей, позволяет большинству деревьев средних и нижних подъярусов не сбрасывать листья, а некоторым листопадным деревьям верхнего подъяруса (*Dipterocarpus* spp., *Azadirachta indica*) раскрывать новые листья почти сразу после листопада, в разгар сухого сезона. По наблюдениям в 2009 г. (Кузнецов, Кузнецова, 2011), а также 2012-2014 гг. (А. Новичонка, А. Аничкина, В. Авилова), массовый вид *Lagerstroemia Calyculata* развивал листья новой генерации после первого дождя достаточной интенсивности, чтобы промочить всю толщу почвы

до глубины 50 см (около 40 мм сут⁻¹, если почва была очень сухая). Это означает, что для начала вегетации лагерстремии достаточно небольшой порции влаги.

Вопросы гидрогеологического строения равнинных частей Кат Тьена, а также глубин корневых систем деревьев остаются открытыми. Разрешить эти вопросы могут данные бурения грунтов в сухой сезон и исследование корневых систем деревьев; обе задачи весьма трудоемки в связи с многочисленными глыбами базальта на глубинах более 1 м. Очевидно, что для энерго- и массообмена леса в Кат Тьене гидрогеология играет очень важную роль.

Годовые величины компонентов водного баланса над лесом в 2012-2013 гг. по сравнению с прилегающими территориями. Итого, за 2012 г. компоненты водного цикла были следующими: осадки (Pr) 2617 мм; суммарное испарение (E) 1527 мм (без поправки на невязку теплового баланса – 1285 мм); изменение влагозапасов почвы ($S_{H_2O_soil}$) -57 мм (т.к. год более сухой по сравнению с предыдущим); по уравнению (1), сток (R) составил 1036 мм. За 2013 г. осадки составили 2634 мм, суммарное испарение 1476 мм, изменение влагозапасов почвы +4 мм, сток 1131 мм.

Средняя годовая сумма осадков за 10 лет (1978-1980 и 1985-1992 гг.) на станции Та Лай, которая расположена на южной границе парка Кат Тьен (примерно в 10 км ниже по течению, чем администрация национального парка), составила 2385 мм, а в Кат Тьене по данным за 7 лет (1985-1992) – 2175 мм (The master..., 1996; The nomination..., 2007). Вероятно, что осадки над большим лесным массивом повышаются относительно окружающих безлесных территорий на несколько сотен миллиметров (однако для уверенного вывода требуется более длительный ряд наблюдений); возможно также, что разница осадков между, с одной стороны, измерениями над лесом за 2012-2013 гг. и, с другой стороны, измерениями в Кат Тьене и в Та Лае обусловлена и увеличением осадков сухого сезона за период 1980-2010 года. Согласно гидрологическим измерениям станции Та Лай за те же 10 лет, R для всего бассейна реки Донг Най выше станции Та Лай составил 1070.4 мм (The master..., 1996). Таким образом, R в Кат Тьене оказался близок к величине, выявленной для бассейна Донг Ная выше Та Лая.

Точность годовой оценки испарения связана в основном с еще не решенной в пульсационном методе проблемой невязки теплового баланса. Заполнение пропусков, составлявших в исходном ряде 45 %, слабо изменяет годовую сумму испарения. Внесение искусственных пропусков¹¹, неопределенность регрессий при заполнении пропусков методом потоков в аналогичных условиях¹² (look-up tables) для годовой суммы испарения дали очень низкий разброс к сумме в 1285 мм за 2012 г. (без поправки на невязку теплового баланса), всего $\pm 3...8$ мм. Оценка годовой суммы E по среднему за год суточному ходу без заполнения пропусков¹³ дает за 2012 г. сумму 1342 ± 47 мм (при оценке среднего по суточному ходу без учета пропусков среднее оказывается смещенным в большую сторону, т.к. пропуски случаются в определенных условиях, при которых потоки в целом слабее). Между тем, поправка на невязку теплового баланса для станции Кат Тьен в 2012 г. составляла +257 мм. В сообществе FLUXNET к настоящему времени принято оценивать годовую сумму испарения с учетом невязки, распределенной по отношению Боуэна H/LE (Eddy..., 2012; обсуждение в разделе 4.1).

Сравнение суммарного испарения в Кат Тьене с другими тропическими лесами мира. Средняя годовая интенсивность испарения (E) в Кат Тьене в 2012 г. составила 4.2 мм сут^{-1} , в 2013 г. – 4.0 мм сут^{-1} (от $2.3\text{--}3.0 \text{ мм сут}^{-1}$ в сухой сезон до $4.3\text{--}5.0 \text{ мм сут}^{-1}$ во влажный сезон). Средняя оценка для влажных тропических лесов по (Bruijnzeel, 1990, стр. 23-25), использовавшем 11 станций, составляла $3.8\text{--}3.9 \text{ мм сут}^{-1}$. Более новая мультимодельная оценка для Амазонии (область от 0 до 20° ю.ш.) составляет 3.7 мм сут^{-1} (Fisher et al., 2009). Как растительность, так и

¹¹ Метод оценки точности заполнения пропусков, при котором в уже заполненный ряд вносятся пропуски такой же длины, как были в исходном ряду, но в случайные участки ряда. После этого внесенные пропуски заполняются по тем же самым алгоритмам, а полученные годовые суммы можно сравнивать.

¹² В методе заполнения пропусков потоками в аналогичных условиях (look-up tables) пропуски заполнялись по регрессиям имеющихся данных об испарении от температуры, солнечной радиации, влажности. Каждый из трех параметров делится на интервалы (к примеру, радиация на интервалы по 50 Вт м^{-2}), в каждом интервале по всем имеющимся значениям испарения считается средний поток. Затем пропуск заполняется найденным средним значением. Для того, чтобы оценить неопределенность регрессий в методе потоков в аналогичных условиях, в каждом интервале оценивают стандартное отклонение значений испарения. Квадратный корень из суммы стандартных отклонений для всех заполненных 30-минутных значений потоков, деленный на количество заполненных значений, и будет оценкой неопределенности заполнения пропусков.

¹³ Для каждого 30-минутного значения (с 0:00 до 0:30 и т.д.) считается среднее за год значение по имеющимся значениям, а полученный суточный ход интегрируется на весь год.

испарение в Амазонии неоднородны: влажные тропические леса в срединной части Амазонии обладают более высоким испарением (4.4 мм сут^{-1}), а южные окраины с разновидностями саванны – более низким ($2.7\text{-}3.3 \text{ мм сут}^{-1}$).

Результаты измерений в тропических лесах осадков (Pr), радиационного баланса (Rn) и испарения (E) для 76 станций-лет приведены в Таблице 1. Pr , Rn и E выражены в одинаковых единицах слоя воды (в случае радиационного баланса имеется в виду толщина слоя воды, который мог бы испариться с затратой данной энергии при $+26^\circ\text{C}$). Сравнение показывает, что лес Кат Тьена NCT (здесь и далее в тексте используются названия станций по кодировке FLUXNET, см. Таблицу 1, за исключением точек измерений, не являющихся станциями FLUXNET) обладает высоким испарением относительно всех тропических лесов мира. Среди лесов Юго-Восточной Азии только одна станция – дренированный, в прошлом заболоченный, лес РКА в Индонезии – отличалась стабильно более высоким испарением, чем NCT. На двух станциях с сильно меняющимся метеорологическим режимом в отдельные годы испарение было выше, чем в NCT: за 2004 г. в переменнo-влажном листопадном лесу MKL (Таиланд) и за 2002 г. во вторичном восстанавливающемся постоянно-влажном вечнозеленом лесу BKS (Индонезия). Сходным с Кат Тьеном в 2012-2013 гг. оказалось испарение в постоянно-влажных вечнозеленых лесах LAM (Малайзия) за 2001-2002 гг. и Янлаппа (Ява, Индонезия) в 1980-1981 годах.

На трех станциях Нового Света испарение намного превышало показатели в Кат Тьене за 2012-2013 года: Казиуана (CAH, Бразилия) в 1999-2003 гг., Гуйафлакс (GUY, Французская Гвиана) в 2004-2005 гг. и Ла Сельва (LAS, Коста-Рика) в 1998-2000 годах. Влажные тропические леса северо-восточной Амазонии испаряют немного больше, чем лес Кат Тьена в 2012-2013 году.

Таблица 1 – Радиационный баланс, осадки и суммарное испарение в тропических лесах¹⁴

Станция	(код FLUX-NET [*])	Тип леса ^{**}	Широта (ю.ш. со знаком -)	Годы измерений	Pr, мм сут ⁻¹ (Pr _d /Pr _w ^{***})	Rn, мм сут ⁻¹ (Rn _d /Rn _w ^{***})	E, мм сут ⁻¹ (E _d /E _w ^{***})	Ссылка
Юго-Восточная Азия								
<i>Вьетнам</i>								
Нам Кат Тьен (Nam Cat Tien)	NCT	SE	11°26′	2012-2014	<u>7.2</u> (0.6/15.6)	<u>5.5</u> (5.5/5.4)	<u>4.1</u> (2.8/4.9)	Данная работа
<i>Малайзия</i>								
Пасо (Pasoh)	PSO	WE	2°53′	2003-2010	4.0-6.1	4.7-5.0	3.5±0.1	Kosugi et al., 2012
Ламбир (Lambir Hills)	LAM	WE	4°12′	2001-2002	5.9 (<u>2.6</u> /12.4)	4.8 (4.1/5.2)	<u>4.2</u> (<u>4.9</u> /3.9)	Kumagai et al., 2005
<i>Таиланд</i>								
Когма (Kog-Ma)	KOG	WEh	18°48′	1998-1999	4.8	-	2.2 (<u>3-4</u> /2-3)	Tanaka et al., 2008
Маемо (Mae Moh)	MMP	T	18°25′	1999-2004	3.8	-	(2.5/4.1)	Attarod et al., 2006; Tanaka et al., 2008
Маеклонг (Mae Klong)	MKL	SD	14°34′	2003-2004	2.0-4.7(0.6- <u>1.9</u> /9.8-10.3)	4.7-4.9 (4.3-4.9/4.7)	2.6 (2.6-2.9/2.3-3.1)	Huete et al., 2008; Fisher et al., 2009
Сакаерат (Sakaerat)	SKR	SE	14°29′	2001-2004	3.2-10.0 (0.0/3.8-14.2)	4.4-4.6 (3.7/5.1)	2.6-2.8 (2.0/2.9)	Huete et al., 2008; Fisher et al., 2009
Так (Tak)	TFM	SEdi	16°56′	1998-1999	3.0 (0.1/5.3)	4.4 (5.1/3.5)	2.5 (2.0/4.5)	Toda et al., 2002
<i>Камбоджа</i>								
Кампонгтхом (Kampong Thom)	KPT	SE	12°44′	2003-2004	4.3	-	3.1 (2.0/3.5)	Nobuhiro et al., 2007; Tanaka et al., 2008; Li et al., 2010
<i>Индонезия</i>								
Букит Соехарто (Bukit Soeharto)	BKS	WEs	0°52′	2001-2004	5.5-6.9 (2.0-2.3/9.9-12.7)	4.4- <u>6.2</u> (4.6-8.7/4.2-5.0)	3.2- <u>4.4</u> (3.8- <u>7.0</u> /2.9-3.1)	Huete et al., 2008; Fisher et al., 2009
Палангкарайа (Palangkaraya)	PKA	WEdr	-1°39′	2002-2005	6.1	-	(<u>4.5</u> /8.2)	Hirano et al., 2007
Янлаппа, Ява (Java, Janlappa nature reserve)	-	WE	-6°	1980-1981	<u>7.9</u>	4.2	<u>4.1</u>	Calder et al., 1986; Li et al., 2010
<i>Китай</i>								
Сишуанбаньна (Xishuangbanna)	-	SE	21°55′	2003-2006	3.6 (0.6/6.1)	-	2.8 (2.6/3.1)	Li et al., 2010

¹⁴Перевод единиц: 3 мм сут⁻¹ соответствуют около 90 мм мес⁻¹ и 1095 мм год⁻¹, 4 мм сут⁻¹ - 1460 мм год⁻¹, 5 мм сут⁻¹ - 1825 мм год⁻¹.

Станция	(код FLUX-NET [*])	Тип леса ^{**}	Широта (ю.ш. со знаком -)	Годы измерений	Pr, мм сут ⁻¹ (Pr _d /Pr _w ^{***})	Rn, мм сут ⁻¹ (Rn _d /Rn _w ^{***})	E, мм сут ⁻¹ (E _d /E _w ^{***})	Ссылка
Южная и Центральная Америка								
<i>Бразилия, Амазония</i>								
Биоложика ду Куэйрас (Biológica do Cuieiras)	M14	WE	-2°35′	1995-1996	5.7 (1.3/11.3)	4.7 (3.5/4.6)	3.1 (2.4/3.3)	Malhi et al., 2002
Жару (Reserva Jaru)	JRU	SE	-10°05′	1999-2002	6.0 (0.4/15.0)	5.1 (4.9/5.2)	3.8 (3.7/3.9)	Von Randow, 2004
Казиуана (Saxiuaná)	CAX	WE	-1°43′	1999-2003	6.8 (2.8/9.3)	-	(2.0/8.1)	Carswell et al., 2002; Fisher et al., 2009
Манаус КМ34 (Manaus KM34)	K34	WE	-2°36′	1999-2006	6.7 (3.1/9.8)	4.8 (4.0/5.0)	(1.6/4.3)	Araújo et al., 2002; Fisher et al., 2009
Пе де Жижанти (Pe de Gigante)	PEG	CSS	-21°37′	2000-2001	4.0	4.4 (3.7/5.3)	3.1 (2.3/3.5)	Da Rocha et al., 2009
Сантарем К83 (Santarem KM83)	S83	WE _{di}	-3°01′	2000-2003	5.2-5.9	4.5 (5.0/4.0)	3.5 (4.0±0.7/ 3.2±0.8)	Goulden et al., 2004; Da Rocha et al., 2004; Fisher et al., 2009
Сантарем КМ67 (Santarem KM67)	S67	WE	-2°51′	2002-2006	5.2-5.9	4.6 (5.2/4.2)	(4.1/3.6)	Saleska et al., 2003; Da Rocha et al., 2009
<i>Коста-Рика</i>								
Ла Сельва (La Selva)	LAS	WE	10°25′	1998-2000	<u>9.6-11.3</u>	<u>5.5-7.2</u>	<u>5.2-6.3</u>	Loescher et al., 2005
<i>Французская Гвиана</i>								
Гуйафлак (Guyaflux)	GUY	WE	5°16′	2004-2005	<u>(0.7/15.8)</u>	-	<u>(6.8/8.0)</u>	Bonal et al., 2008; Fisher et al., 2009

Примечания. * Станции FLUXNET – мировой сети пульсационных наблюдений – имеют кодовые трехзначные названия. В таблице приведены названия в соответствии с интернет-сайтом FLUXNET <http://fluxnet.ornl.gov/>

** Типы тропических лесов: влажный вечнозеленый – WE, переменнo-влажный вечнозеленый – SE, переменнo-влажный листопадный – SD; в том числе горный – h, нарушенный – di, вторичный восстанавливающийся – s, осушенный – dr; бразильская cerrado sensu stricto (растительность, сходная с фруктовым садом, средняя высота деревьев 6 м) – CSS; плантация тика – T

*** Pr – осадки; Rn – радиационный баланс, выраженный в мм слоя воды, который мог бы испариться, если бы вся энергия ушла на испарение; E – суммарное испарение. Индекс _d означает поток в сухой сезон, _w – во влажный сезон; под сухим и влажным сезоном понимаются два самых сухих и два самых влажных месяца. В случаях, когда суммарное испарение определено пульсационным методом, учитывается поправка на невязку теплового баланса по отношению Боуэна H/LE. Через дефис указаны значения в разные годы. Подчеркнуты значения, близкие или большие, чем приведенные в данной работе для станции Кат Тьен.

В целом, необычным оказался факт, что переменно-влажный лес, половина деревьев которого сбрасывают листья во второй половине сухого сезона, может испарять столько же влаги и даже больше, чем первичные постоянно-влажные вечнозеленые леса (например, Пасо PSO в Малайзии; Манаус M14 и Сантарем S83 в Бразилии). При этом климатологический сухой сезон (последовательные месяцы, в каждый из которых выпадает менее 100 мм осадков) в Кат Тьене составляет 4 месяца (в 2012-2013 гг. за 4 месяца сухого сезона в сумме выпало около 15 мм осадков, в 2013-2014 – 12 мм), а на упомянутых станциях M14 и PSO последовательные два месяца с суммой осадков в каждом менее 100 мм считаются уже засушливой аномалией (Araújo et al., 2002; Kosugi et al., 2012).

Объяснение высокого годового суммарного испарения леса Кат Тьен лежит, по-видимому, в следующих фактах: 1) большое количество ресурсов как влаги, так и тепла в течение года; 2) синхронное повышение ресурсов тепла и влаги, благодаря чему в сезон дождей экосистема получает не только больше влаги, но и больше солнечной радиации, чем в сухой сезон; 3) наличие в сухой сезон в грунте воды в количестве, достаточном для вегетации нижних и частично верхних подъярусов леса в течение сухого сезона (по Куричева и др., 2014).

Рассмотрим подробнее первый пункт: высокую тепло- и влагообеспеченность муссонного леса NCT.

Только 3 станции из 22, для которых имеются прямые или косвенные данные по радиационному балансу, имеют стабильно больший радиационный баланс, чем Кат Тьен – PKA, LAS и GUY. На 2-х станциях (BKS и CAX) радиационный баланс был выше только в некоторые годы. Особенно важную роль для формирования испарения играет повышенный радиационный баланс во влажный сезон. Причины высокой суммы радиационного баланса (особенно во влажный сезон) в NCT обсуждаются ниже.

Сумма осадков больше только на 2 станциях из 22 (Янлаппа и LAS) и примерно такая же еще на одной станции (GUY). Значительное увеличение годового количества осадков на данных станциях, обусловлено, по-видимому, особенностями местного рельефа: станции расположены на наветренной стороне

возвышенности по отношению к воздушным массам влажного сезона. Высокая сумма осадков в Нам Кат Тьене обусловлена общим повышением местности на северо-восток: при набегании юго-западного муссона возвышенность дает дополнительные орографические осадки (Дещеревская и др., 2013). Таким образом, из 22 рассматриваемых станций в тропических лесах НСТ входит в 5 самых обеспеченных теплом и влагой. Из всех рассматриваемых станций выделяется LAS (Коста-Рика), где в 2004-2005 гг. зафиксировано самое большое среди всех лесов годовое испарение тропического леса (в 2 раза выше, чем в среднем по Амазонии), а также значительно большее количество ресурсов для испарения – как тепла, так и влаги.

Необходимо заметить, что в общем случае при увеличении облачности снижается солнечная радиация и повышается сумма осадков, т.е. увеличение ресурсов тепла и влаги происходит в противофазе. За счет чего может достигаться одновременное увеличение солнечной радиации и осадков (как это имеет место в Кат Тьене)? По-видимому, преимущества в доступных ресурсах имеют экосистемы территорий, на которых наблюдается максимум облачности и осадков в темное время суток. В частности, к таким станциям относятся прибрежные станции, на которых поток летнего муссона (с океана на сушу) ночью разнонаправлен с бризовым потоком (бриз ночью дует с суши на океан), за счет чего два потока конвергируют и порождают облачность и осадки (Kousky, 1980; Ohsawa, 2001). Днем в результате уменьшения облачности прибрежные наветренные для муссона станции получают больше не только солнечной радиации, но и осадков: в Юго-Восточной Азии на станциях с ночным максимумом общая сумма осадков примерно в 2 раза больше, чем на станциях с дневным максимумом (Ohsawa, 2001). На суше обычен максимум конвекции и осадков днем, во время максимального прогрева поверхности (однако, этот максимум может наблюдаться в довольно широком диапазоне – от 13 до 18 ч). На территории южного Индокитая пик осадков выявлен около 18 ч (Ohsawa, 2001), что совпадает и с данными по Кат Тьену, в котором 43 % осадков в 2012 г. выпадали с 16:30 до 20:30. Иными словами, высокая сумма радиационного

баланса (особенно во влажный сезон) обусловлена вечерним пиком конвекции, облачности и осадков.

В итоге, сочетание муссонной и бризовой циркуляции порождает определенный суточный ход осадков, который явно сказывается на количестве ресурсов тепла и влаги у экосистем экваториальной зоны. На станциях, наветренных по отношению к летнему экваториальному муссону, во влажный сезон увеличивается количество солнечной радиации при столь же (и даже более) высокой сумме осадков.

Чтобы выявить лимитирующие факторы годовой суммы эвапотранспирации, необходимо рассмотреть разницу Pr , Rn и E на разных станциях в сухой и влажный сезон (Таблица 2).

Осадки – наиболее изменчивый ресурс в тропических лесах: в конкретные годы даже в постоянно-влажных лесах осадки 2-х месячного сухого сезона могут быть на 50-70 % меньше, чем во влажные месяцы, а в переменно-влажных лесах в двухмесячный сухой сезон осадков может не быть вообще. Несмотря на это, испарение в сухой сезон может даже значительно повышаться на тех станциях, где увеличивается и радиационный баланс (TFM). На всех станциях, кроме САХ и К34, испарение в сухой сезон превышало осадки. Следовательно, вода, необходимая для испарения, либо поступала из постоянных грунтовых вод, либо запасалась в самой экосистеме с влажного сезона.

Во влажный сезон на всех станциях испарялось от 41 до 71 % осадков; на испарение затрачивалось 57-86 % радиационного баланса (испарение на станции Янлаппа за год оказалось равным радиационному балансу, что вызывает сомнения в точности этих оценок). На 12 станциях из 19, по которым имеются данные о испарении (E) для влажного и сухого полугодия отдельно, E и Rn во влажное полугодие были выше, чем в сухой (как и в NCT). Если в сухой сезон испарение снижается быстрее, чем радиационный баланс, испарение, по-видимому, лимитируется доступной влагой. Это справедливо для станций NCT, SKR, K34, в меньшей степени M14 и PEG.

Таблица 2 – Соотношения между компонентами водного баланса и радиационным балансом в сухой и влажный сезон*

Код FLUXNET (название станции)	Pr_d/Pr_w	Rn_d/Rn_w	E_d/E_w	E/Pr (%)	E/Rn (%)	E_d/Pr_d (%)	E_w/Pr_w (%)
Старый Свет							
NCT	0.03	1.02	0.57	57	76	470	31
PSO		-	-	69	72	-	-
LAM	0.21	0.79	1.26	71	88	190	31
KOG		-	1.40	46	-	-	-
MMP		-	0.61	-	-	-	-
MKL	0.12	0.98	1.02	78	54	220	27
SKR	0.00	0.73	0.69	41	60	-	32
TFM	0.02	1.46	2.25	83	57	4500	38
KPT		-	0.57	72	-	-	-
BKS	0.19	1.45	1.80	61	72	251	27
PKA		-	0.55	-	-	-	-
Янлаппа		-	-	52	98	-	-
Сишуанбаньна	0.10	-	0.84	78	-	433	51
Новый Свет							
M14	0.12	0.76	0.73	54	66	185	29
JRU	0.03	0.94	0.95	63	75	925	26
CAX	0.30	-	0.25	-	-	71	87
K34	0.32	0.80	0.37	-	-	52	44
PEG		0.70	0.66	78	70	-	-
S83		1.25	1.25	63	78	-	-
S67		1.24	1.14	-	-	-	-
LAS		-	-	55	91	-	-
GUY	0.04	-	0.85	-	-	971	51

*Обозначения см. в примечаниях к Таблице 1

Суточный ход составляющих водного баланса. Осадки, приходная часть водного баланса, в Кат Тьене имеют выраженный суточный ход, 43 % суточной нормы осадков выпадает между 16:30 и 20:30 (раздел 3.1). Только в пик влажного сезона закономерность несколько размывается и фиксируются ливни в ночное и утреннее время. Аналогичный ход имеет и облачность. Поэтому максимум

радиационного баланса, «ответственного» за испарение, остается высоким в течение года и приходится на 12 ч дня (Рисунок 8, а, б).

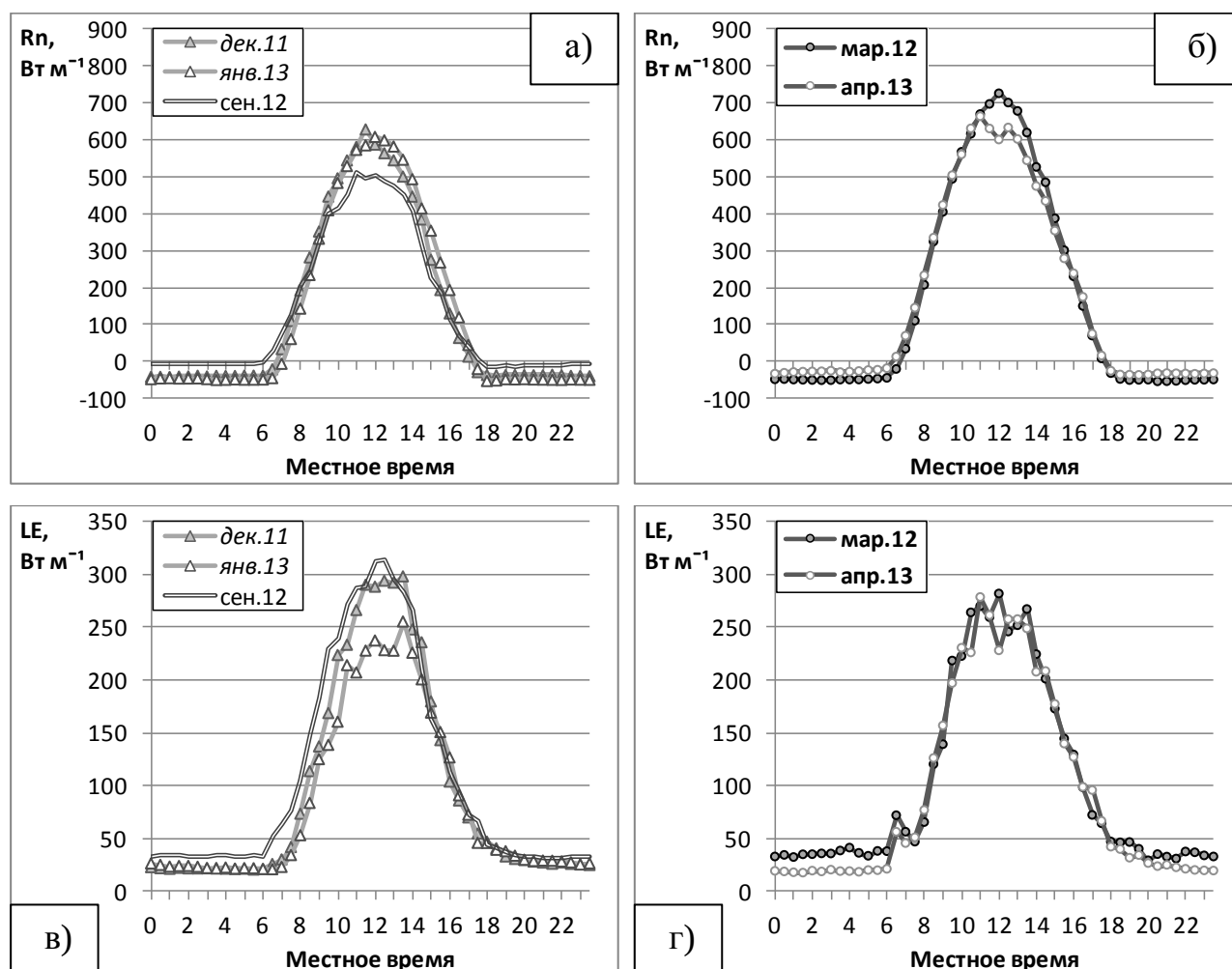


Рисунок 8 – Суточный ход испарения (LE) в сравнении с суточным ходом радиационного баланса (R_n):

а), в) – в первой половине сухого сезона (декабрь 2011 г., январь 2013 г.) и пике влажного сезона (сентябрь 2012 г.);

б), г) – во второй половине сухого сезона (март 2012 г., апрель 2013 г.)

Максимум суммарного испарения¹⁵ в суточном ходе в начале сухого сезона смещен на 14-15 ч, так же, как смещен максимум дефицита водяного пара (см. (Рисунок 8, в) в сравнении с Рисунок 3, г раздела 3.1). Т.е. дефицит водяного пара в начале сухого сезона выступает фактором, усиливающим испарение. Ко второй половине сухого сезона дефицит водяного пара в сочетании с

¹⁵ При анализе суточного хода испарения поправка на невязку теплового баланса не учитывалась

интенсификацией водного стресса деревьев уже приводит, по-видимому, к частичному закрытию устьиц. Суточный ход испарения не имеет ярко выраженного максимума (Рисунок 8, г).

В сухой сезон и в переходные сезоны с 10:30 до 13:30 поток влаги в атмосферу колебался приблизительно на одном уровне. Во влажный сезон, когда ограничений на транспирацию нет, суточный ход испарения имеет выраженную максимум в 12:00-12:30 (Рисунок 8, в), сразу после пика радиационного баланса в суточном ходе.

Влияние факторов внешней среды на суммарное испарение. С увеличением температуры испарение сначала быстро растет, однако при температуре 31-32 °С достигает максимума, а потом постепенно снижалось (см. Рисунок 3 раздела 4.1). Это связано, по-видимому, с обезвоживанием листьев растений. Низкое испарение при температуре 24-26 °С связано с тем, что такая температура наблюдалась в утренние и вечерние часы, когда приходило мало солнечной радиации.

По регрессии, взятой для 30-минутных значений в течение всего периода наблюдений, испарение резко возрастало при увеличении объемной влажности почвы 10 до 20 %, затем – более плавно при влажности от 20 % до 30 %, а при дальнейшем увеличении влажности почвы возрастало очень медленно. При относительно низкой температуре (24-26 °С) испарение оставалось небольшим, так как данная температура чаще наблюдалась в утренние и вечерние часы при низкой радиации. По среднесуточным значениям с вычтенным сезонным трендом суммарное испарение сильнее всего коррелирует с радиационным балансом, немного слабее – с суммарной радиацией и еще немного слабее – с фотосинтетически активной радиацией; коэффициенты корреляции испарения и радиационных характеристик по всем сезонам превышают 0.75. Положительная корреляция $r=0.43$ была отмечена между испарением и дефицитом влажности воздуха.

Оценка физического испарения – испарения с поверхности почвы и испарения перехваченных осадков. Соотношение физического и биологического испарения важно для оценки роли биологических и абиологических факторов в формировании динамики суммарного испарения (раздел 5.2).

В случае сомкнутого тропического леса физическое испарение с поверхности почвы значительно меньше транспирации. Простая аппроксимация (Kelliher et al., 1995) испарения с поверхности достаточно увлажненной почвы выражается следующим уравнением:

$$LE_s = \varepsilon Rn_s / (\varepsilon + 1) \quad (8),$$

где LE_s – испарение с поверхности почвы, ε – скорость изменения содержания скрытого тепла насыщенного воздуха с изменением содержания явного тепла (при 20 °C $\varepsilon=2.2$), Rn_s – радиационный баланс на поверхности почвы. В тропическом лесу радиационный баланс поверхности почвы составляет несколько процентов от радиационного баланса над пологом, поэтому при радиационном балансе, к примеру, 800 Вт м⁻² (солнечный полдень) и суммарном испарении 600 Вт м⁻² испарение с поверхности почвы по формуле (8) составит 20-30 Вт м⁻² (3-5 % от суммарного испарения). В итоге, доля испарения с почвы в в суммарном испарении сомкнутого многоярусного тропического леса невелика.

Перехват в Кат Тьене, по данным измерений 28 дождей от 0.8 до 49.1 мм (общая сумма измеренных дождей 501.1 мм), составил всего около 7.6±6.9 % от выпадающих осадков за период 06.2012-07.2013. Аналогичный показатель в тропическом лесу Пасо (Малайзия) составил 19 % (Konishi et al., 2006), на Борнео (Малайзия) – 14.5 % (Manfroï et al., 2004), в ненарушенном лесу на Калимантане (Индонезия) – 11 %, в нарушенном там же – 6 % (Asdak et al., 1998); в среднем, по оценке на 14 станциях, перехват составил 13 % (Bruijnzeel, 1990). В измерениях в Кат Тьене, как и в некоторых цитированных выше работах, не учитывался стволовой сток (осадки, стекающие по стволам); однако в равнинных тропических

лесах на стволовой сток приходится менее 5 % от осадков, проникающих под полог леса (Raich, 1983; Lloyd, 1988; Bruijnzeel, 1990; Manfroï et al., 2004).

Средняя величина перехвата в Кат Тьене за один дождь составила 1.4 ± 1.2 мм, причем от силы дождя не зависела. Был зафиксирован очень большой случайный разброс величин перехвата, что подтверждает необходимость набора больших рядов данных для статистики (не менее 40 измерителей для одного дождя, осреднение по многим дождям). В сухой сезон доля перехвата повышалась до 10-38 % от выпавших осадков, что было связано со снижением средней суммы осадков за один дождь, в то время как средняя величина перехвата оставалась постоянной.

В среднем за 2011-2013 гг. перехват давал 13 % от суммарного испарения (также см. Дещеревская, 2012) или 7.4 % от среднегодовой суммы осадков, что близко к оценке 8.5 % от осадков для станции Ламбир в Малайзии за 2001-2002 года (Manfroï et al., 2006).

Таким образом, физическое испарение (с поверхности почвы и испарение перехваченных осадков) в сумме составляли не более 20 % суммарного испарения в Кат Тьене.

Выводы по разделу. За 2012 г. в Кат Тьене осадки (Pr) составили 2617 мм; суммарное испарение (E) 1527 мм (без поправки на невязку теплового баланса – 1285 мм); изменение влагозапасов почвы ($S_{H_2O_soil}$) -57 мм (т.к. год более сухой по сравнению с предыдущим); сток (R) 1036 мм. За 2013 г. осадки составили 2634 мм, суммарное испарение 1476 мм, изменение влагозапасов почвы +4 мм, сток 1131 мм. Получившаяся величина стока близка к рассчитанной (The master..., 1996; The nomination..., 2007) по расходу воды за 10 лет на измерительной станции Та Лай, которая расположена на юго-восточной границе парка Кат Тьен.

Проведенные в ходе данной работы измерения осадков под пологом леса, а также оценка испарения влаги с поверхности почвы позволили определить долю транспирации в суммарном испарении – более 80 %.

Высокое испарение во влажный сезон и в целом за год в Кат Тьене обусловлено особенностями поступления ресурсов тепла и влаги: как годовая

сумма радиационного баланса, так и годовая сумма осадков высока, причем во влажный сезон эти два ресурса коррелированно возрастают.

Испарение в сухое полугодие по сравнению с влажным полугодием снижалось в 2012 и 2013 гг. всего на 17 и 33 %, соответственно. В два самых сухих месяца E снижалось на 50-51 % относительно двух самых влажных месяцев. Снижение E было вызвано уменьшением листового индекса, а также лимитированием по доступной влаге; доступная энергия в сухие полугодия 2012 и 2013 гг. снижалась только на 1 и 13 % соответственно. В течение 4 сухих месяцев испарение поддерживалось за счет грунтовой влаги: либо накопленной во влажный сезон в глубоких слоях почвы, либо постоянных грунтовых вод. Высокое испарение в целом в Кат Тьене может быть также обусловлено омоложением леса вследствие частичных вырубок зрелых деревьев: по данным Руднева (Руднев, 2003, с. 161), наибольшей величины транспирация достигает при нормированном возрасте леса 0.3 от 1, где 1 – возраст массового отмирания доминантных видов.

Растения вынуждены охлаждать листья посредством испарения воды с листовых поверхностей (транспирации). Если влаги в экосистеме оказывается недостаточно для транспирации, растения закрывают устьица, а в случае усиления водного дефицита – сбрасывают листья. Т.к. газообмен фотосинтеза также осуществляется через устьица, недостаток влаги накладывает ограничения на продуктивность в условиях засухи, усиливающейся к концу сухого сезона. Лимитирование по влаге в Кат Тьене фенологически выражается через сбрасывание листьев примерно у половины деревьев первого подъяруса; облиственные деревья справляются с дефицитом влаги путем частичного закрытия устьиц. Однако, наличие значительных количеств воды в грунте, доступной для корней деревьев, позволяет большинству деревьев 2-4 подъярусов и части деревьев 1 подъяруса быть облиственными в пик сухого сезона. Несмотря на чрезвычайно низкую сумму осадков в течение 4 месяцев, муссонный тропический лес NCT продолжал активно функционировать и, таким образом, использовал засушливое время для создания биологической продукции. Активное

использование сухого сезона для фотосинтеза возможно благодаря расходованию больших количеств воды из грунта. Резкие изменения видового состава биоценозов муссонных лесов при изменении условий почвенного увлажнения или при переходе от одного типа почвы к другому, по-видимому, объясняются именно гидрогеологическими условиями. Гидрогеологические условия необходимо принимать во внимание при лесоразведении в муссонном тропическом климате.

4.3. Потоки и баланс углекислого газа

В данном разделе рассмотрены потоки углекислого газа (и, соответственно, входящего в его состав углерода) между муссонным тропическим лесом и атмосферой.

В экосистеме одновременно идут два противоположно направленных процесса: во-первых, фотосинтез, в результате которого происходит поглощение углекислого газа (CO_2) из атмосферы и фиксация углерода в органическом веществе, и, во-вторых, дыхание, в результате которого органическое вещество окисляется и CO_2 выделяется обратно в атмосферу. В результате первого процесса создается продукция, в результате второго происходит деструкция органического вещества. Разность между выделенным и поглощённым CO_2 называется нетто-обменом CO_2 экосистемы и прямо измеряется пульсационным методом. Валовая первичная продукция (результат фотосинтеза) и дыхание непосредственно не измеряются; но нетто-обмен можно разделить на два противоположно направленных потока с помощью расчетных методов. Отдельно выделяют накопление углекислого газа в пологе леса, которое рассчитывается по получасовым значениям профиля углекислого газа на разных уровнях в пологе леса. В общепринятой терминологии изменение запаса CO_2 также относится к потокам CO_2 .

Структуру углеродного баланса определяет соотношение факторов, способствующих, с одной стороны, созданию и, с другой стороны, разложению органического вещества. К примеру, к таким факторам относятся фотосинтетически активная радиация, состояние растительного полога, доступность влаги для транспирации, температура и влажность воздуха и другие.

Общие замечания. Зеленые растения поглощают углекислый газ (CO_2) из окружающего воздуха в процессе фотосинтеза, переводя неорганический атмосферный CO_2 в органическое вещество в тканях растений. Органическое вещество, созданное фитоценозом на определенной площади за определенное время, называется валовой первичной продукцией **GPP** (gross primary production). Продукцию можно представить как поток углерода или CO_2 из атмосферы в растения и выразить в единицах веса/количества вещества на единицу площади за единицу времени (молях или граммах на квадратный метр, к примеру, $\text{мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ или $\text{г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$). У растений с C3 и C4 типами фотосинтеза, т.е. закрепляющих углерод на первой стадии фотосинтеза в соединениях с тремя либо четырьмя атомами углерода, фотосинтез происходит на свету. Существуют также растения с САМ-типом фотосинтеза (суккуленты), вырабатывающие органическое вещество в темноте. Однако количество суккулентов во влажном тропическом лесу незначительно, поэтому для целей данной работы можно считать, что создание валовой первичной продукции тропического леса происходит на свету, днем. Интенсивность фотосинтеза зависит от ряда факторов (Farquhar, von Caemmerer, 1980):

- интенсивности солнечной радиации в фотосинтетически активном диапазоне (ФАР или PAR; 380-710 нм);
- концентрации CO_2 в мезофилле листа (зависящей от концентрации CO_2 в приустыичном воздухе);
- температуры; температурный оптимум фотосинтеза лежит в пределах +20...+35 °C (Cannell, Thornley, 1998);
- доступности элементов минерального питания, в первую очередь азота, фосфора и калия;

- соотношения водного потенциала листа и воздуха, влияющего на степень раскрытия устьиц на листьях;
- влагосодержания листьев;
- состояния растений: у больных или ослабленных растений фотосинтез ослабевает.

При увеличении интенсивности солнечной радиации интенсивность фотосинтеза сначала увеличивается, а затем выходит на плато. График зависимости фотосинтеза от уровня освещенности называется **световой кривой**. С повышением концентрации CO_2 в воздухе значимо повышается температура выхода фотосинтеза на максимальный уровень, а также уровень светового насыщения (Cannell, Thornley, 1998).

Помимо фотосинтеза, непрерывно (и днем, и ночью) идет процесс дыхания тканей растений, микроорганизмов почвы и животных, при котором органическое вещество окисляется и CO_2 возвращается обратно в атмосферу. *Процессы разложения органического вещества в экосистеме (в результате чего происходит выделение CO_2 автотрофами и гетеротрофами) принято называть общим дыханием экосистемы **Reco** (ecosystem respiration).* Также дыханием экосистемы **Reco** называется выделяющийся *поток* CO_2 . Дыхание измеряется в тех же единицах, что и продукция. Многочисленные исследования показали, что дыхание экспоненциально зависит от температуры субстрата (Lloyd, Taylor, 1994; Falge et al., 2002; Reichstein et al., 2005); максимальное дыхание у растений наблюдается при $+40...+55\text{ }^\circ\text{C}$; на свету дыхание увеличивается (прибавляется фотодыхание – процесс, сопутствующий фотосинтезу).

Разницу между дыханием экосистемы и валовой первичной продукцией называют **нетто-обменом углерода *NEE*** (net ecosystem exchange). *NEE* является, по сути, небольшой разницей между двумя большими величинами – потоками дыхания и первичной продукции; измеряется в тех же единицах. Нетто-обмен углерода принимается положительным, если экосистема является источником углерода, и отрицательным, если экосистема поглощает углерод из атмосферы. Таким образом, если дыхание больше продукции, *NEE* положителен – например,

ночью: продукция равна нулю, а весь поток углерода из экосистемы равен дыханию. Утром после восхода солнца происходит резкий всплеск фотосинтетической активности, и *NEE* принимает отрицательные значения. К концу дня по мере снижения первичной продукции и роста дыхания *NEE* опять пересекает нулевую отметку и уходит в область положительных значений.

Как и для фотосинтеза, для нетто-обмена CO_2 можно построить световые кривые. Одним из параметров световой кривой *NEE* является **световой компенсационный пункт (СКП)** – минимальный уровень освещенности, при котором фотосинтез уравнивает дыхание, нетто-обмен углерода равен нулю.

На *NEE* экосистемы влияет весь спектр факторов, определяющих фотосинтез и дыхание (Wood, Cavaleri, Reed, 2012). Связи динамики *NEE* с изменением условий окружающей среды часто нелинейны, т.к. задействованы два разных процесса со своими ответными реакциями, а дыхание к тому же протекает различно в разных компонентах экосистемы (Cannell, Thornley, 2000).

Ночью при слабой турбулентности, когда фотосинтез прекращается, в пологе леса происходит накопление углекислого газа в результате дыхания до величин, в 1.5-2 раза превышающих концентрацию над пологом. Утром с развитием турбулентности накопленный углекислый газ выбрасывается вверх. В итоге, при измерениях потоков на одном уровне – над пологом – одновременно недоучитывается ночное дыхание и сглаживается утренний пик фотосинтеза (хотя суммарный нетто-обмен экосистемы за сутки измеряется верно). Поэтому для коррекции суточного хода потоков *GPP* и *Reco* требуется также рассчитывать накопление углекислого газа внутри полога *St* (storage). В целом за сутки изменение запаса CO_2 в пологе близко к нулю, однако ночью оно положительно, а в утренние часы, когда усиливается ветер и происходит выброс CO_2 из полога, изменение запаса отрицательно и достигает величин, сравнимых с величиной валовой первичной продукции.

Итак, **углеродный нетто-обмен экосистемы с атмосферой *NEE*** представляет собой разность потоков дыхания *Reco* и валовой первичной продукции *GPP* с учетом изменений запаса *St*:

$$NEE = Reco - GPP + \Delta St \quad (9)$$

Полный углеродный обмен экосистемы не ограничивается только обменом с атмосферой, но также включает **перемещение растворенного органического вещества, карбонат-ионов и углекислого газа** поверхностными и подземными водами. Обозначим сумму всех добавочных потоков за R_c . Примем, что R_c положительно, если органическое вещество вымывается из почвы. Сумма NEE и R_c называется полным углеродным балансом экосистемы C_f . Если C_f на длительных сроках отрицателен, в растениях либо почве будет происходить накопление углерода.

Из общих теоретических соображений (Odum, 1969; Уиттекер, 1980) следует, что климаксная растительность в неизменных условиях среды на длительных периодах (несколько лет-десятилетие) будет иметь нулевой углеродный баланс с окружающей средой¹⁶. Запас (пул) углерода экосистемы в таком случае не будет изменяться, т.е. входные потоки вещества будут равны его потерям. Неизменность пула углерода означает, что средний размер и состав растений не будет изменяться; в лесной мозаике развитие подроста будет скомпенсировано отмиранием старых деревьев; количество углерода в почве и подстилке не будет увеличиваться или уменьшаться. В случае одного растения это означает, что углерод, усвоенный растением в процессе фотосинтеза, целиком выделится обратно в атмосферу/грунтовые воды после того, как растение отомрет и разложится. Молодой или восстанавливающийся после нарушений лес будет аккумулировать углерод в растущих деревьях; пока он не достигнет зрелости, полный баланс углерода экосистемы и тем более нетто-обмен углерода с атмосферой будут оставаться отрицательными. Ненулевые нетто-потоки на долгих периодах также могут быть характерны для лесов, находящихся в нестационарных условиях – при потеплении или похолодании, увеличении/уменьшении количества осадков, при изменении концентрации углекислого газа над пологом леса и так далее.

¹⁶ Это не касается болотных и заболоченных экосистем, активно запасующих углерод в торфе.

В Кат Тьене действует сразу несколько факторов нестационарности:

- 1) по-видимому, лес восстанавливается после антропогенных нарушений (Blanc et al., 2000; Novichonok, 2012);
- 2) как и на всей планете, последние два столетия увеличивается концентрация углекислого газа в воздухе (Keeling, Whorf, 2005);
- 3) в 1980-2010 гг. происходило увеличение осадков в сухой сезон (Дещеревская и др., 2013);
- 4) в 1980-2010 гг. происходил рост температуры всех месяцев, кроме самых жарких (Дещеревская и др., 2013).

Теоретически, первые два фактора должны работать на увеличение первичной продукции экосистемы и долгосрочное депонирование (поглощение) углерода экосистемой из атмосферы. Второй фактор называется одним из основных для стока углерода в тропических лесах (Lewis et al., 2009a; Lapola et al., 2009), особенно не лимитированных по фосфору (Lewis et al., 2009b), хотя некоторые экспериментальные (полученные методом пульсационных наблюдений) и теоретические соображения ставят большую значимость «CO₂-удобрения» под сомнение (Kumagai et al., 2004; Körner, 2009; Wright, 2013). Во многих экосистемах бореального, умеренного и субтропического поясов были проведены многолетние эксперименты по увеличению концентрации CO₂ в воздухе на экосистемном уровне, как в открытом воздушном пространстве экосистемы (проект FACE), так и в открытых сверху камерах, захватывающих целиком отдельные деревья (Norby et al., 2005). Эксперименты показали, что в первые годы может происходить увеличение аккумуляции углерода в растениях, особенно в молодых деревьях и травах, но со временем (10 лет) эффект «CO₂-удобрения» нивелируется. Тем не менее, к 2010 году не было начато ни одного эксперимента по увеличению концентрации CO₂ на уровне экосистемы в тропических лесах (Körner, 2009; Lapola et al., 2009; http://www.niaes.affrc.go.jp/outline/face/english/globalface_e.html), поэтому прямых измерений влияния увеличения концентрации CO₂ на рост тропических лесов нет.

Увеличение влажности в сухой сезон может приводить к повышению интенсивности как фотосинтеза, так и дыхания экосистемы. Влияние повышения температуры как на фотосинтез, так и на дыхание неоднозначно. Экспоненциальное увеличение дыхания при росте температуры, ведущее к эмиссии большого количества углекислого газа, может сгладить эффекты восстановления леса, увеличения увлажнения в сухой сезон и роста концентрации CO_2 в атмосфере. Так как факторы действуют разнонаправлено, важно для прогноза углеродного баланса рассмотреть влияние каждого фактора на каждый процесс по отдельности и эффекты совместного влияния факторов на процессы.

Годовая величина и сезонная динамика нетто-обмена углерода экосистемы. Измерения в национальном парке Кат Тьен показывают, что тропический сезонно-влажный лес был стоком углерода из атмосферы в целом за весь период измерений (Рисунок 9, закрашено поле *NEE*).

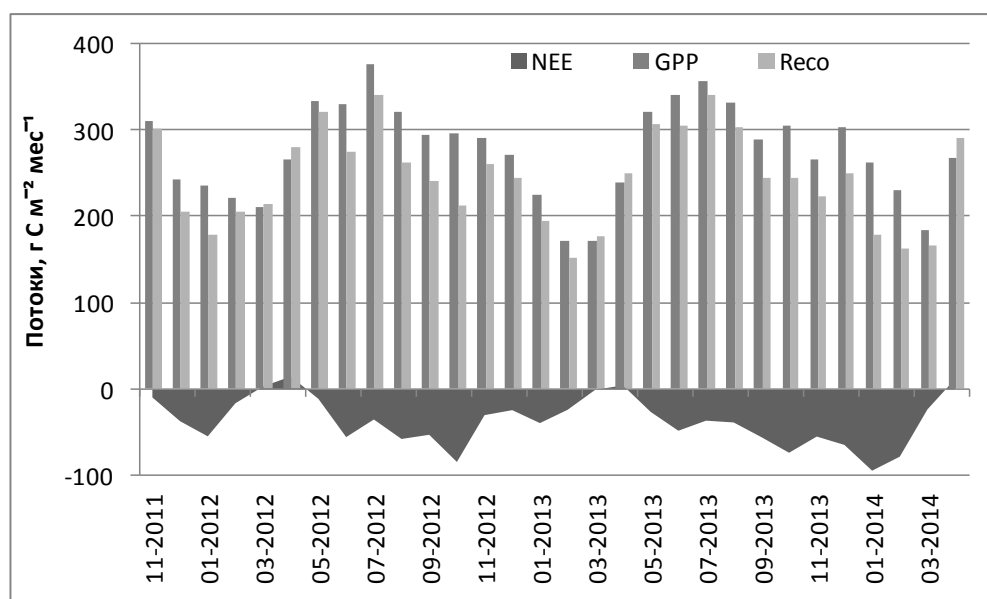


Рисунок 9 – Экосистемный нетто-обмен углерода (*NEE*), валовая первичная продукция (*GPP*) и экосистемное дыхание (*Reco*) по месяцам за период измерений

В 2012 г. значение *NEE* составило $-402 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, в 2013 г. $-453 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Если брать в рассмотрение период с ноября 2011 г. по октябрь 2012 г. (более влажный и прохладный сухой сезон, чем в среднем за 30 лет), то баланс составит $-392 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Если же учитывать период с мая 2012 по апрель

2013 г. (сухие и жаркие условия в сухой сезон), то баланс составит $-409 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

В самые жаркие месяцы (апрель 2012, 2013, 2014 гг.) баланс углерода тропического сезонно-влажного леса оказывался немного больше нуля либо приближался к нулю. Повышение *NEE* до нуля (т.е. ситуация, при которой выделение экосистемой CO_2 больше или примерно равно поглощению) в жаркие месяцы является результатом самого большого за год отношения валовой первичной продукции к дыханию экосистемы. Дыхание становится выше, чем в сухой сезон, за счет самой высокой в году температуры и увеличения влажности, а фотосинтез ослабляется в связи с еще низким листовым индексом (деревья только раскрывают новые листья), высокой температурой воздуха и низкой влажностью почвы и воздуха. Повышение дыхания в начале сухого сезона (ноябрь 2011 г., ноябрь-декабрь 2012 г., декабрь 2013 г.), по-видимому, связано с высыханием многочисленных водоемов и разложением накопившегося в них органического вещества. В 2011 г. это привело к повышению *NEE* почти до нуля.

Во влажный сезон и в середине сухого сезона *NEE* оставался отрицательным (лес поглощал углекислый газ из атмосферы). Сток углерода в сухой сезон увеличивался (отрицательные значения *NEE* увеличивались по модулю) при увеличении увлажнения: в более влажный период 2011-2012 гг. месячная сумма *NEE* достигала $-54.2 \text{ г С м}^{-2} \text{ мес}^{-1}$, а в засушливый период 2012-2013 гг. только $-38.9 \text{ г С м}^{-2} \text{ мес}^{-1}$. Однако, если температура понижается до минимальных значений по ночам, то она играет большую роль для интенсификации стока углерода, т.к. сильно снижает дыхание экосистемы: в самый прохладный сухой сезон 2013-2014 гг. сток углерода достигал $-94.1 \text{ г С м}^{-2} \text{ мес}^{-1}$.

В целом, при имеющейся точности измерений (см. ниже), невозможно оценить, становится ли лес в более сухих и жарких условиях сухого сезона (нейтральная фаза Эль-Ниньо 2012-2013 и 2013-2014 гг.) дополнительным источником углерода по сравнению с более влажными условиями (фаза Ла-Нинья 2011-2012 года).

Оценка точности расчета годового баланса углерода представляет собой отдельную весьма нетривиальную задачу вследствие многочисленных 1) погрешностей самих измерений; 2) различий в методах расчетов потоков и заполнения пропусков (Kruijt et al., 2004; Papale et al., 2006; Rannik et al., 2006; Richardson et al., 2006; Richardson, Hollinger, 2007). Соответственно, прежде чем была получена озвученная выше величина нетто-обмена углерода в Кат Тьене в -402 г С м^{-2} за 2012 г. и -453 г С м^{-2} за 2013 г., был проведен ряд этапов расчета суммы (Таблица 2 раздела 2.2 и Таблица 3, на примере изменения сумм по этапам расчета для данных по 2012 году).

Этапы I-II были описаны в разделе 2.2. Альтернативные пути заполнения пропусков (этапы III-IV Таблицы 2 раздела 2.2 и Таблицы 3) и основания для выбора в данной работе определенных путей будут рассмотрены ниже.

Стандартный статистический метод оценки точности средней величины включает расчет стандартного отклонения (σ) и стандартной ошибки оценки среднего ($\sigma/\sqrt{n}$, где σ – среднеквадратичное отклонение, а n – число измерений). Стандартное отклонение должно оцениваться по однородному ряду одной и той же случайной величины. Для метеорологических величин, как правило, можно оценивать σ среднесуточных значений. Однако в случае пульсационных измерений по имеющимся данным нельзя оценить среднесуточные, так как в наблюдениях много пропусков, особенно в ночное время. Процессы в ночное и дневное время качественно различны; поэтому заполнение пропусков не может осуществляться для дня и ночи одинаково.

В разное время суток измеряются, по сути, разные случайные величины: математическое ожидание потока углерода в разные часы суток различно (днем – отрицательное, ночью – положительное). Требуется интегральная оценка точности измерений разных случайных величин. Условно можно считать, что число этих случайных величин соответствует числу 30-минутных интервалов в сутках, т.е. 48 штукам (в методе пульсационных наблюдений принимается однородность каждого 30-минутного интервала).

Таблица 3 – Альтернативные пути заполнения пропусков по нетто-обмену углерода (*NEE*) экосистемы для оценки годовой суммы *NEE**, с примером изменения годовых сумм по этапам расчета для данных по 2012 году

Этап	Изменение суммы <i>NEE</i> за 2012 г. относительно предыдущего пункта расчетов**, г С м ⁻² год ⁻¹	Итоговое значение <i>NEE</i> ** за 2012 г., г С м ⁻² год ⁻¹
Этап I. Годовая сумма по исходным данным		
Этап II. Работа с незаполненными данными о <i>NEE</i>		
Этап III. Годовая сумма по среднему суточному ходу без заполнения пропусков		-589±255
Этап IV. Заполнение пропусков:		
1) метод потоков в аналогичных условиях + метод нелинейных регрессий (реализация MPI***)		-402±20
2) метод потоков в аналогичных условиях + метод нелинейных регрессий (реализация FAT***, 36 классов для каждой переменной, окно заполнения шириной 15 дней)		-449
3) метод потоков в аналогичных условиях + метод нелинейных регрессий (реализация FAT, 36 классов для каждой переменной, окно заполнения шириной 31 день)		-433
4) метод нелинейных регрессий (FAT), световые кривые		-299
5) метод нелинейных регрессий (FAT), день – световые кривые, ночь – зависимость дыхания от температуры		-581
6) метод потоков в аналогичных условиях (реализация FAT, 10 классов, окно шириной 15 дней)		-529
7) метод потоков в аналогичных условиях (реализация FAT, 20 классов, окно шириной 15 дней)		-432
8) метод потоков в аналогичных условиях (реализация FAT, 36 классов, окно шириной 15 дней)		-407
9) метод потоков в аналогичных условиях (реализация FAT, 36 классов, окно шириной 31 день)		-442
10) модельная оценка (день – световые кривые, ночь – зависимость температуры от дыхания) без использования реальных значений, по регрессиям от метеопеременных, в FAT		-556
11) Еще 10 пробегов (реализация MPI) с внесением случайных пропусков, последующее заполнение как в пункте 1 этапа IV		от -296 до -432
12) заполнение ночных пропусков средним за сезон значением по (Kosugi et al., 2012)+дневные пропуски по пункту 1 этапа IV		-372

* Примечание 1. Более подробно о методах см. текст

** Примечание 2. Сумма *NEE* за 2012 г. для этапов I и II была получена путем заполнения исходных рядов (без накопления *St*, с выбросами, с потоками в условиях слабого ветра) на сайте Института Макса Планка (MPI), Германия по методу потоков в аналогичных условиях

*** Примечание 3. Реализация MPI – пропуски заполнены в он-лайн инструменте на сайте Института Макса Планка (MPI), Германия (см. ниже в тексте). Реализация FAT – пропуски заполнены в инструменте Flux-Analysis Tool (Ueyama et al., 2012), Япония

В случае измерений пульсационным методом пропуски обычно занимают не меньше половины ряда, причем случаются в определенных метеорологических условиях (слабая турбулентность; ливень и некоторое время после него), поэтому заполнение пропусков смещает среднее значение ряда. После удаления низкокачественных данных осталось только 34 % 30-минутных значений за 2 полных года (2012 и 2013); отдельно в 2012 г. показатель несколько выше – 43 %. Тем не менее, общее количество оставшихся 30-минутных значений *NEE* с хорошим качеством в 2012-2013 гг. составило 11793, что немало для статистических выводов за 2 года; большое количество значений, несмотря на значительную долю пропусков, достигается высокой частотой и автоматизацией измерений (см. раздел 2.2).

После Этапов I-II (раздел 2.2) при обработке пульсационных измерений, которые отличаются хорошей дискретностью, однако большим процентом пропусков, можно предложить следующую общую последовательность оценки среднего годового значения нетто-обмена углерода и точности этого значения:

Этап III. Оценить грубо, по суточному ходу без заполнения пропусков;

Этап IV. Заполнить пропуски с помощью различных способов и сравнить между собой результаты.

Помимо этого, косвенной оценкой точности пульсационного метода является невязка замыкания теплового баланса, все компоненты которого измеряются. Однако для потока CO_2 , как принято в настоящее время сообществом FLUXNET, не вводится поправка на невязку теплового баланса (см. раздел 3.1).

Наиболее грубым и простым алгоритмом оценки среднего за год значения *NEE* и его точности является следующий (Этап III Таблицы 3): найти средний за год суточный ход, рассчитанный без заполнения пропусков, и оценить его погрешность (Рисунок 10).

Средний суточный ход представляет собой среднее из всех имеющихся в 365 днях значений за конкретные 30 минут (например, с 0:00 до 0:30). В качестве ошибки каждого индивидуального 30-минутного значения фигурирует среднеквадратичное отклонение остатков, полученное после вычитания из

исходных значений среднего за год значения (отдельно для каждого получасового значения в течение суток). Средний за 2012 г. суточный ход имеет хорошую точность даже по ряду, 57 % которого составляют пропуски. Нужно отметить, что при оценке среднего по суточному ходу без учета пропусков среднее окажется смещенным в отрицательную сторону, т.к. пропуски случаются в определенных условиях, когда потоки в целом близки к нулю или положительны.

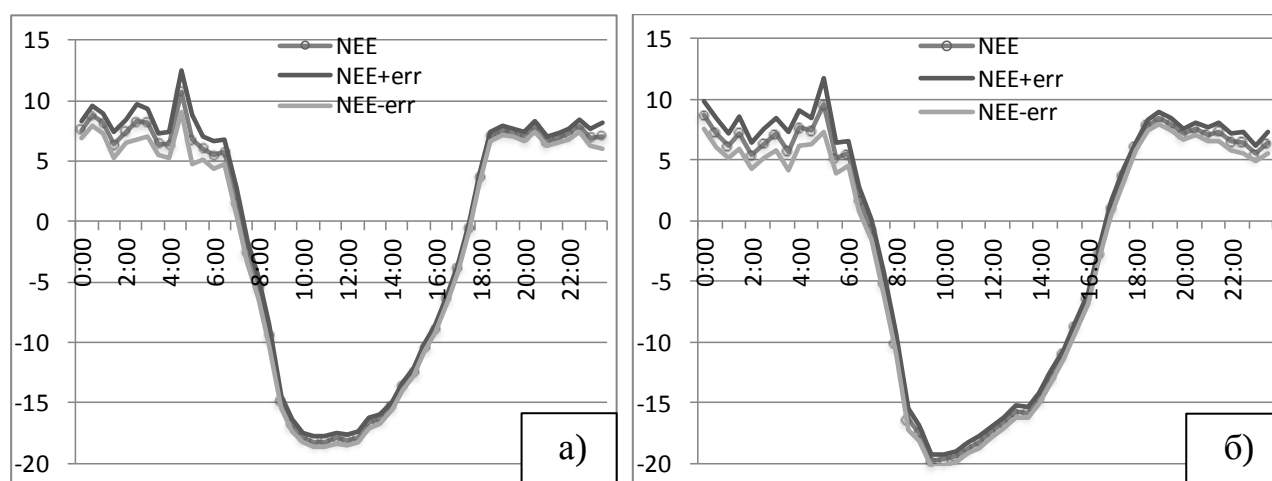


Рисунок 10 – Средний суточный ход нетто-обмена углерода экосистемы (NEE) без заполнения пропусков и точность его оценки (Этап III Таблицы 3):

а) за 2012 год;

б) за 2013 год.

Средний суточный ход, показанный линией с круглыми маркерами, осреднен по всем имеющимся в 366/365 днях значениям за конкретные 30 минут (например, с 0:00 до 0:30). Средняя за год ошибка для данного 30-минутного интервала (err) посчитана как среднее квадратическое отклонение остатков, получающихся при вычитании из всех начальных данных для конкретного интервала среднего за год значения. Верхняя кривая соответствует $NEE+err$, нижняя $NEE-err$

Если ошибку годовой суммы по методу среднего за год суточного хода (Этап III Таблицы 3) найти как площадь между верхней и средней кривой на Рисунке 10, оценка NEE за 2012 год составит -589 ± 255 г С м⁻² год⁻¹, за 2013 год составит -694 ± 292 г С м⁻² год⁻¹.

В общем, учитывая большой процент пропусков, ошибку расчета годовой суммы потока углерода обычно вычисляют по ошибке заполнения пропусков

(Kruijt et al., 2004; Papale et al., 2006). Наиболее важны алгоритмы заполнения пропусков в ночное время.

Заполнение пропусков (Этап IV Таблицы 3) может осуществляться различными способами, причем в научном сообществе сети FLUXNET общепринятого способа пока нет. Наиболее часто используются следующие способы заполнения пропусков: 1) сочетание метода нелинейных регрессий с методом потоков в аналогичных условиях, т.н. методом look-up tables (Этап IV, пункты 1-3 Таблицы 3); 2) метод потоков в аналогичных условиях и метод нелинейных регрессий по отдельности, в скользящем окне (Этап IV, пункты 4-9 Таблицы 3); 3) по среднему суточному ходу за определенный промежуток времени, например, за месяц, либо вообще за год (по сути, Этап III Таблицы 3); 4) заполнение синусоидой, домноженной на амплитудный коэффициент; 5) нейронные сети; 6) моделирование (Этап IV, пункт 10 Таблицы 3).

При фиксированном пороге турбулентности $u^*=0.176 \text{ м с}^{-1}$ пропуски за 2012 г. были заполнены несколькими различными способами.

Метод потоков в аналогичных условиях в сочетании с методом нелинейных регрессий был реализован для станции Кат Тьен на сайте Института Макса Планка (MPI), Германия¹⁷. В данном методе значения потоков заполнялись по регрессиям от температуры, солнечной радиации, влажности воздуха в аналогичных условиях. Аналогичными считались условия, при которых температура, суммарная радиация и дефицит водяного пара различались не более чем на $2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 50 Вт м^{-2} и 5 ГПа , соответственно. Заполнение осуществлялось в окне шириной 7-14 дней.

Заполнение пропусков по методу (Этап IV, пункт 3 Таблицы 3) на сайте MPI дал годовую сумму потока углерода $NEE=-402\pm 20 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ в 2012 г. и $-453\pm 14 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ в 2013 г. (Рисунок 11, «алгоритм MPI»). В наиболее проблемные периоды (влажный сезон, ночи) заполнение пропусков по алгоритму MPI осуществлялось в окне 14 дней, каждое значение было осреднено из

¹⁷ <http://www.bgc-jena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/format.php>

примерно 20 значений – то есть в каждой ночи сентября осталось в среднем всего 1-2 значения (!). Метод оказался весьма чувствителен к наличию выбивающихся значений, т.к. несколько больших ночных значений (однозначно как выбросы не классифицируемые) сильно изменяли итоговую сумму за месяц.

Заполнение пропусков по тому же методу нелинейных регрессий в сочетании с методом потоков в аналогичных условиях, но в инструменте Flux-Analysis Tool (FAT) с более подробным делением на классы условий (Этап IV, пункт 2 Таблицы 3), дает $NEE = -449$ (36 классов для каждой переменной, окно заполнения шириной 15 дней) или -433 (36 классов, окно шириной 31 день) г С м^{-2} в 2012 году (Этап IV, пункт 3 Таблицы 3).

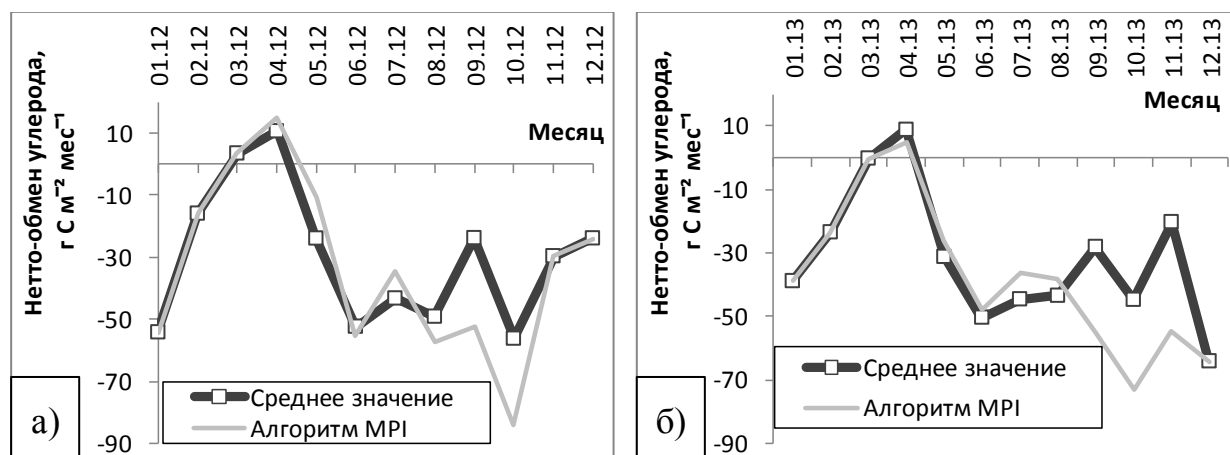


Рисунок 11 – Сумма нетто-обмена углерода экосистемы (NEE) в зависимости от алгоритма заполнения ночных значений влажного сезона (с апреля по октябрь-ноябрь), подробнее см. текст:

а) за 2012 год;

б) за 2013 год

Заполнение пропусков в FAT по методу нелинейных регрессий, когда все пропуски заполнялись с использованием световых кривых, показало годовую сумму $-299 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (Этап IV, пункт 4 Таблицы 3). Заполнение пропусков в FAT по методу нелинейных регрессий, когда дневные пропуски заполнялись с использованием световых кривых, а ночные по модели дыхания от температуры, показало годовую сумму $-581 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (Этап IV, пункт 5 Таблицы 3).

Отдельно по методу значений в аналогичных условиях (Этап IV, пункты 6-9 Таблицы 3) пропуск заполнялся средним значением в аналогичных условиях при данной ширине окна. Годовая сумма в этом случае составила $-529 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (Этап IV, пункт 6 Таблицы 3: 10 классов, окно шириной 15 дней), $-432 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (Этап IV, пункт 7 Таблицы 3: 20 классов), $-407 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (Этап IV, пункт 8 Таблицы 3: 36 классов), $-442 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (Этап IV, пункт 9 Таблицы 3: 36 классов, окно шириной 31 день).

Также была использована модельная оценка годовой суммы *NEE* в инструменте FAT (Этап IV, пункт 10 Таблицы 3), происходившая в три шага:

а) Дневные данные использовались для подгона коэффициентов в световых кривых;

б) Ночные данные использовались для подгона коэффициентов в модели зависимости дыхания от температуры;

в) Затем только по этим двум моделям, без использования реальных значений *NEE*, восстанавливались 30-минутные значения потока на основании регрессий от метеорологических переменных.

Тогда оценка годовой суммы потока углерода составила $-556 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

На сайте MPI также существует возможность оценки точности годовой суммы, для которой в случайное место ряда вносятся пропуски такой же длины, как в исходном ряду, и сумма считается вновь (Этап IV, пункт 11 Таблицы 3). 10 дополнительных пробегов с внесением случайных пропусков и последующим заполнением методом значений в аналогичных условиях дают разброс годовой суммы *NEE* от -296 до $-432 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ с средним значением $-368 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Особенности метода пульсационных наблюдений приводят к тому, что пропуски случаются в периоды, в которые поток углерода более высок (положителен/ слабо отрицателен) – ночью либо в дождь. Смещение годовой суммы при заполнении пропусков за счет этого эффекта в Кат Тьене может составлять до $+106 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, в среднем же увеличивает выброс углерода на $34 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

Чтобы избежать большого влияния ночных выбросов на годовую сумму и придать оценке большую устойчивость, было произведено заполнение ночных

значений влажного сезона по алгоритму (Этап IV, пункт 12 Таблицы 3), описанному в статье Косуги с соавторами (Kosugi et al., 2012) для дождевого тропического леса Пасо (Малакка, Малайзия). Ночные значения экосистемного дыхания в Пасо в 2003-2009 гг. находились в слабой зависимости и от температуры, и от влажности и были заполнены средним значением за весь год по данным с хорошим качеством (турбулентный поток CO_2 больше нуля, изменение запаса CO_2 больше нуля, нетто-обмен в границах от 5 до 15 $\text{мкмоль м}^{-2} \text{с}^{-1}$). Для леса Кат Тьен ночные значения за влажный сезон 2012 года (1.04-25.10) и 2013 г. (21.04-29.11) были заполнены средним арифметическим за этот период по значениям *NEE* с лучшими флагами (1-3 по 9-балльной шкале), при развитой турбулентности ($u^* > 0.176 \text{ м с}^{-1}$ в 2012 г. и $u^* > 0.158 \text{ м с}^{-1}$ в 2013 г.), попадающими в границы от 0 до 20 $\text{мкмоль м}^{-2} \text{с}^{-1}$. Среднее ночное значение дыхания экосистемы по обозначенным критериям во влажный сезон 2012 г. оказалось равным 8.73 $\text{мкмоль м}^{-2} \text{с}^{-1}$, во влажный сезон 2013 г. – 8.62 $\text{мкмоль м}^{-2} \text{с}^{-1}$. Итоговая сумма *NEE* немного отличалась от предыдущей оценки в сторону меньшего стока и была равной $-359 \text{ г С м}^{-2} \text{год}^{-1}$ для 2012 г. и $-381 \text{ г С м}^{-2} \text{год}^{-1}$ для 2013 года (Рисунок 11, «среднее значение»).

Таким образом, оценка годового нетто-обмена углерода тропического представляет собой сложную и нетривиальную задачу. Мы полагаем, что помимо более-менее стандартной методики заполнения пропусков методом значений в аналогичных условиях стоит указывать также оценки, полученные при использовании большого количества способов заполнения пропусков. Тогда нетто-обмен экосистемы будет выражаться не одним числом, а диапазоном значений (ансамблем) с наиболее вероятным значением, полученным стандартным методом либо методом, признанным исследователем наиболее устойчивым в данных условиях.

В случае Кат Тьена «стандартное значение» нетто-обмена углерода за 2012 г. составило $-402 \pm 20 \text{ г С м}^{-2} \text{год}^{-1}$, а «устойчивое значение» $-359 \text{ г С м}^{-2} \text{год}^{-1}$; за 2013 г. «стандартное значение» нетто-обмена углерода составило $-453 \pm 14 \text{ г С м}^{-2} \text{год}^{-1}$, а «устойчивое значение» $-381 \text{ г С м}^{-2} \text{год}^{-1}$.

Разброс годовых значений NEE , полученных при использовании различных способов заполнения пропусков (что можно расценивать как диапазон возможных, но менее вероятных значений годового обмена) дают значения NEE (без учета точности оценки в каждом случае) в Кат Тьене за 2012 г., как показано на диаграмме (Рисунок 12), т.е. диапазон возможных значений составил от -296 до -581 г С м⁻² год⁻¹. Большой разброс полученных значений адекватен сложности используемого пульсационного метода и его ограничениям в тропических условиях.

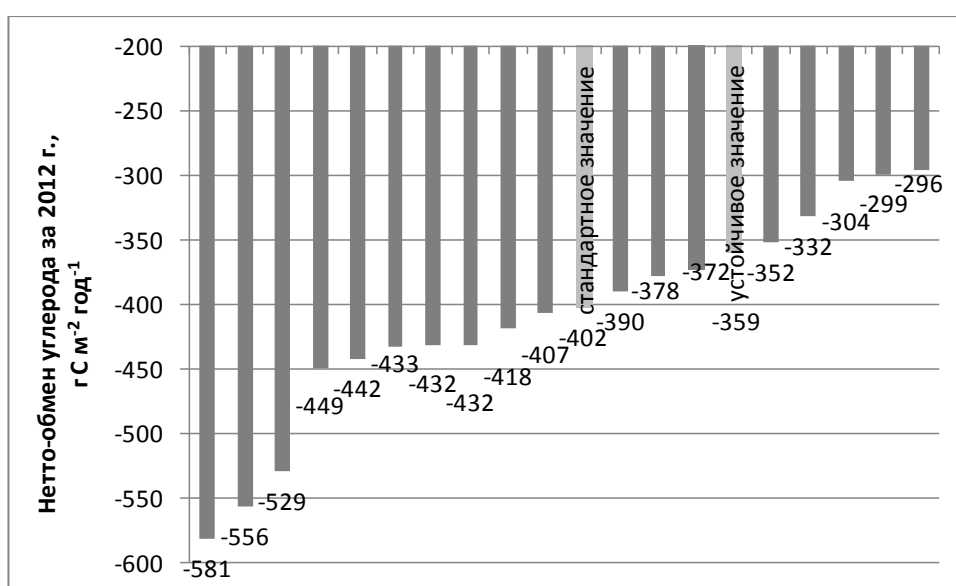


Рисунок 12 – Ранжированная диаграмма разброса оценок годового нетто-обмена углерода (Кат Тьен, 2012 г.); разброс возникает вследствие использования различных алгоритмов заполнения пропусков, пояснения см. в тексте

Наиболее неясным пунктом в оценках годового нетто-обмена углерода тропического леса НСТ остается ночное дыхание экосистемы. Пропуски в данных о ночном нетто-обмене вследствие низкой турбулентности, выпадения осадков и по другим причинам составили в 2012 г. 86 % 30-минутных интервалов (для сравнения, в дневных данных – 37 % 30-минутных интервалов), в 2013 г. – 88 % 30-мин периодов. Фактически, ночные данные о потоках восстанавливались по редким ночным периодам с интенсивной турбулентностью. В среднем же во все

сезоны значения динамической скорости ветра по ночам были ниже порога турбулентности, особенно в самое дождливое время.

Независимой оценкой точности полученных данных о дыхании экосистемы являются данные по дыханию почвы (являющегося основной частью дыхания экосистемы), которое измерялось в Кат Тьене около станции пульсационных измерений в период 10.2012-09.2013. За этот период дыхание почвы было почти равно общему экосистемному дыханию (приблизительная оценка, личное сообщение В. Авилова), что указывает либо на недооценку эмиссии углерода из леса Кат Тьен по пульсационным данным, либо на ошибки фракционирования, т.е. выделения дыхания экосистемы расчетным путем из нетто-обмена.

В связи с изложенными неопределенностями мы считаем, что величину дыхания экосистемы необходимо уточнять при помощи камерных измерений дыхания отдельных компонентов экосистемы (стволов, ветвей, листьев, а также почвы), как это было сделано в тропическом лесу Бразилии у Манауса (Chambers et al., 2004) и на основе этих данных посчитано для леса Пасо в Малайзии (Kosugi et al., 2011). Результаты экстраполяции камерных измерений на экосистемный уровень повысили сумму экосистемного дыхания и привели к повышению нетто-обмена углерода в Пасо примерно на $300 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, сделав лес источником углерода вместо стока. Однако по пульсационному методу с заполнением ночных пропусков «оптимальными» значениями в Пасо был получен значительно менее интенсивный сток углерода, чем в Кат Тьене (в среднем $-131 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ по измерениям в 2003-2010 годах).

В любом случае, в 2012 и 2013 гг. в Кат Тьене, с учетом всех поправок, получен необычный для пульсационных измерений в тропических лесах результат – значительный сток углерода в размере около $400\text{-}450 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

Сравнение полученной суммы углеродного баланса с другими тропическими лесами мира. Весьма разнообразные оценки, от значительных стоков углерода ($600\text{-}1100 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$) до небольших источников ($80 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$) в тропических лесах земного шара были получены пульсационным и биометрическим (учет изменений биомассы) методами (Таблица 4). Оценки

нетто-баланса углерода тропических лесов для отдельных континентов и особенно в целом для тропиков (Таблица 5) отражают разнородность, противоречивость и в общем – недостаточность данных, накопленных к концу 2000-х годов, для глобальных оценок. Биометрические учеты в целом показывали небольшой сток углерода в тропических лесах за 1980-2000-е годы. В некоторых тропических лесах пульсационные наблюдения давали довольно значительный сток углерода, в других – близкие к нулевым оценки.

По данным на нескольких точках пульсационных наблюдений в Центральной Амазонии за вторую половину 1990-х – начало 2000-х годов Грейс и Малхи (Grace, Malhi, 2002) показывали большой сток углерода в Амазонии, в среднем $NEE = -500 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

Эта «неожиданно большая» величина стока в большинстве случаев была обусловлена неучетом поправки на слабую турбулентность (Miller et al., 2004). Во всех работах по пульсационным измерениям до 2004 года по Амазонии не вводилась поправка на слабую турбулентность (т.е. данные, полученные при слабой турбулентности, не исключались из анализа), однако сомнения в надежности полученных величин NEE уже высказывались. Так, Араужо (Araújo et al., 2002) полагал, что полученный им углеродный баланс в Амазонии $-160 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (K34, Manaus) и $-520 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (C14, Manaus) за 1999-2000 гг. может быть занижен и указывает, что более вероятна оценка в среднем для Амазонии $-130 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (Malhi, Grace, 2000). В 2004 г. вышла работа Миллера (Miller et al., 2004), показавшего, что поправка на слабую турбулентность в тропических лесах играет очень большую роль и обязательно должна учитываться; она сильно повышает величину NEE (в направлении от стока к источнику) – так, на станции KM83 после учета поправки на слабую турбулентность NEE изменился с -400 до $+40 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Тем не менее, для некоторых (Luyssaert et al., 2007) обзорных работ за 2007-2009 гг. и даже 2014 г. все еще использовали данные, полученные до 2004 года, что приводило к заниженному NEE .

Таблица 4 – Нетто-обмен углерода тропических лесов (отдельные станции)

Станция	(код FLUX- NET*)	Тип леса **	Годы измерений	Pr , мм год ⁻¹	T , °C	NEE , г С м ⁻² год ⁻¹	Ссылка
Юго-Восточная Азия							
<i>Вьетнам</i>							
Нам Кат Тьен (Nam Cat Tien)	NCT	SE	2012-2013	2621, 2634	25.9	-401,-453	Данная работа
<i>Малайзия</i>							
Пасо (Pasoh)	PSO	WE	2003-2009	1451÷2235	25.3	-73÷64	Asiaflux****; Kosugi et al., 2012
Ламбир (Lambir Hills)	LAM	WE	2003	2263	25.9	>-200,<0	Kume et al., 2011; Chen et al., 2013
<i>Таиланд</i>							
Маеклонг (Mae Klong)	MKL	SD	2003-2004	738, 1708	27.5	-164, 83	Asiaflux; Huete et al., 2008
Сакаерат (Sakaerat)	SKR	SE	2001-2003	1152÷3050	24	-472÷-164	Asiaflux; Huete et al., 2008
Сакаерат (Sakaerat)	SKR	SE	2002-2003	1152÷1813	24	>0, <100	Sajgusa et al., 2008
<i>Индонезия</i>							
Букит Сохарто (Bukit Soeharto)	BKS	WEs	2001-2004	2015, 2536	28.0	-328÷-185	Asiaflux; Huete et al., 2008
<i>Китай</i>							
Сишуанбаньна (Xishuangbanna)	-	SE	2003-2006	1487	21.7	-119(EC***), -359(BM****)	Tan et al., 2010
Южная и Центральная Америка							
<i>Бразилия, Амазония</i>							
Казиуана (Caxiуana)	CAX	WE	1999-2003	2314	26.9	-560÷-1190	Carswell et al., 2002; Malhi et al., 2004; Malhi et al., 2009a
Манаус КМ34 (Manaus KM34)	K34	WE	1995-1996	2272	27.1	-130	Malhi et al., 2009b
Сантарем К83 (Santarem KM83)	S83	WE _{di}	2001-2003 (BM 1984- 2000)	2200	24.8	-100÷-60(EC), 80(BM)	Da Rocha et al., 2004; Miller et al., 2004; Da Rocha et al., 2011; Miller et al., 2011
Сантарем КМ67 (Santarem KM67)	S67	WE	2001-2004	1811	24.8	-22÷268	Da Rocha et al., 2009; Hutyrа et al., 2007
<i>Коста-Рика</i>							
Ла Сельва (La Selva)	LAS	WE	1998-2000	4000	24.6	-64÷-695	Loeschер et al., 2003
<i>Французская Гвиана</i>							
Паракоу (Paracou)	GUY	WE	2004-2011	3041	-	-341(EC-DA)	Rowland et al., 2014

Таблица 5 – Нетто-обмен углерода тропических лесов, полученный разными методами, по обзорным работам

Территория, особенности выборки	Работа	Метод, особенности метода	NEE, качественная характеристика и величина в $\text{г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$
Юго-Восточная Азия, Африка			
33 учетные площади в тропиках Старого Света, период 1979-1998	Phillips et al., 1998	ВМ, учет наземной биомассы	-18±59
Ненарушенные леса Африки, 1990-е	Ciais et al., 2008	Модельная оценка, модель ORCHIDEE	-47
Тропическая Юго-Восточная Азия, 3 станции – PSO, SKR, MKL; всего 7 станций-лет	Sajgusa et al., 2008	ЕС, в данных для SKR присутствуют выбросы	«в тропических лесах поток NEP***** был небольшим»; >-100, <100
Тропическая Юго-Восточная Азия	Kato, Tang, 2008	ЕС	-180.1±361.7
Тропическая Юго-Восточная Азия, 4 станции – PSO, SKR, MKL, LAM	Chen et al., 2013	ЕС	2 станции >-200, <0 и 2 станции >0 и <200
Южная и Центральная Америка			
120 учетных площадей во влажных тропиках Нового Света	Phillips et al., 1998	ВМ ^{***} , учет наземной биомассы	-71±34
Тропики Нового Света	Malhi, Grace, 2000	К оценке (Phillips et al., 1998) добавлена оценка депонирования С в почве по среднему сроку пребывания С в почве	-130
Несколько станций-лет в Центральной Амазонии (область ок. 73-54 °з.д. и 0-7 °ю.ш.)	Grace, Malhi, 2002	ЕС, без поправки на слабую турбулентность	«Неожиданно большой сток», -500
59 учетных площадей в зрелых лесах Амазонии, период 1979-1998	Baker et al., 2004	ВМ, учет наземной биомассы в деревьях диаметром больше 10 см	-98±38
59 учетных площадей в зрелых лесах Амазонии, в среднем период 1988-2000	Phillips et al., 2009	ВМ, учет наземной биомассы в деревьях диаметром больше 10 см	-62±23
Тропики Нового Света	Phillips et al., 2009	ВМ, учет наземной биомассы в деревьях диаметром больше 10 см, расчет для подземной биомассы и некромассы	-79±29

Территория, особенности выборки	Работа	Метод, особенности метода	<i>NEE</i> , качественная характеристика и величина в $\text{г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$
<i>Тропики всего Земного шара</i>			
153 учетные площади во влажных тропиках, из них 120 – в Новом Свете, в среднем за 1980-1996	Phillips et al., 1998	BM, учет наземной биомассы	-77±54
29 станций во влажных тропиках, но не на всех прямо измерено <i>NEE</i>	Luyssaert et al., 2007	BM, EC, в т.ч. на части станций не учтена поправка на слабую турбулентность	-403±102
156 учетных площадей во влажных тропиках, в среднем за 1987–96	Lewis et al., 2009a	BM, учет наземной биомассы	-49 (29-66)

Примечания к таблицам 4 и 5.

* Станции FLUXNET – мировой сети пульсационных наблюдений – имеют кодовые трехзначные названия. В таблице приведены названия в соответствии с интернет-сайтом FLUXNET <http://fluxnet.ornl.gov/>

** Типы тропических лесов: влажный вечнозеленый – WE, переменнo-влажный вечнозеленый – SE, переменнo-влажный листопадный – SD; в том числе: нарушенный – di, вторичный восстанавливающийся – s;

*** Данные, полученные с помощью методов: BM – учеты биомассы, EC – пульсационный, EC-DA – сочетание пульсационного метода с моделированием;

**** Asiaflux – расчеты по базе Asiaflux с использованием стандартного метода (Таблица 3 раздела 4.3)

***** *NEP* – нетто-продукция экосистемы. В некоторых исследованиях нетто-баланс углерода экосистемы, полученный пульсационным методом, приравнен к нетто-продукции.

В работе, претендующей на мировой охват данных («Old-growth forests as global carbon sinks», Luyssaert et al., 2008), включающей результаты учетов биомассы, камерных измерений дыхания экосистем и пульсационных наблюдений, нетто-обмен углерода для лесов мира оценивался в $-130 \pm 50 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Однако «тропические леса были исключены из анализа, т.к. в базе данных только 12 станций с оценкой *NEP* [нетто-продукция экосистемы]» (Luyssaert et al., 2008).

Данных по нетто-обмену углерода в тропических лесах Африки крайне мало, по пульсационным измерениям до настоящего момента публикаций нет, а учетов биомассы немного. По численным экспериментам, проведенным с помощью динамической модели растительного покрова ORCHIDEE (Ciais et al., 2008), в 1990-х гг. ненарушенные леса Африки слабо аккумулировали углерод в размере около $47 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

В работах (Saigusa et al., 2008; Kosugi et al., 2012) показано, что *NEE* первичных тропических лесов Юго-Восточной Азии на трех станциях сети ASIAFLUX – Мае Клонг, Сакаерат и Пасо (Mae Klong, Sakaerat, Pasoh) – в течение 2-7 лет наблюдений колебался около нуля. Однако в базе данных для станции Сакаерат в Таиланде (первичный сезонно-влажный лес) содержались большие выбросы; пересчет по стандартной методике данной работы с удалением выбросов привел к стоку в Сакаерате величиной $100 \div 400 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Примерно такой же сток был зафиксирован и на станциях Букит Соехарто в Индонезии (вторичный восстанавливающийся после пожаров 1998-1999 гг. макаранговый лес высотой около 10 м), и Сишуанбаньна в Южном Китае (первичный сезонно-влажный тропический лес). Полученный в Кат Тьене сток превышает оценки для трех упомянутых станций, однако диапазоны оценок (считая точность измерений годового *NEE* методом пульсационных наблюдений за $\pm 100 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$) перекрываются.

Углеродный баланс в тропических лесах мира, расход углерода. Учеты биомассы и оценка среднего времени пребывания углерода в почвах за 1980-1990-е гг. в хорошо дренированных лесах Амазонии давали долгосрочный прирост в $70 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ в биомассе и столько же в почве, т.е. происходила аккумуляция примерно 140 г углерода в почве и биомассе каждый год. В сезонно затапливаемых лесах, согласно (Grace, Malhi, 2002), каждый год аккумулировалось только 10 г углерода в биомассе и столько же – в почве, т.е. в сумме $20 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Также существует вынос из экосистем некоторого количества углеродосодержащих соединений с поверхностными и подземными водами, а также с летучими органическими соединениями (метан, изопрены, монотерпены), которые выделяются листьями и не измеряются пульсационным методом (Guenther, 1997). По (Grace, Malhi, 2002), с растворенным в поверхностных и подземных водах органическим углеродом из тропических лесов Амазонии выносилось $60 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, а с летучими органическими соединениями – $50 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Таким образом, в биомассу, почвы, летучие органические соединения и сток в Амазонии в конце XX века поступало около $250 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

Более новые данные Ауфденкампа (Aufdenkampe et al., 2011) свидетельствуют о немного меньшей величине вымывания углерода со стоком в сезонно-влажной южной части Амазонии – $40 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ в форме растворенного CO_2 и $10 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ в форме растворенного органического углерода. Обзор существующих данных по величине выноса углерода со стоком приводится у Раймонда (Raymond et al., 2013): по данным 21 точек измерений в тропиках, в среднем на квадратный метр в год ручьи и реки выносят 12.8 г С . Данные отдельно по восьми точкам в Юго-Восточной Азии (в основном в Индонезии и Малайзии) дают величину $26.8 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, а максимальная величина $47.5 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ была зафиксирована в Мьянме. Вклад постоянных озер в вынос углерода мал, не превышает $1 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Однако, Раймонд указывает на то, что заболоченные территории в Амазонии и Юго-Восточной Азии слабо изучены и являются «горячими точками» по выносу углерода, и для уточнения выноса углерода с них требуются систематические измерения (Raymond et al., 2013).

Меньшая величина выноса углерода с летучими органическими веществами в тропических лесах, чем в работе (Grace, Malhi, 2002), приводится в работе (Saito et al., 2008): $10 \div 27 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

Обсуждение возможных причин стока углерода в тропическом лесу Кат Тьен. Полученная сумма *NEE* за 2012 г. означает, что лес в Кат Тьене функционировал как сток углерода в размере 400 г углерода на квадратный метр в год или 4 тонны углерода на гектар в год. Биомасса по оценкам (Novichonok et al., 2012) составляет 400-700 т С га⁻¹. Если считать, что добавочный углерод поступает в биомассу, то при подобном стоке за 100 лет произошло бы увеличение биомассы вдвое, что сомнительно. Однако, по-видимому, на территории Нам Кат Тьена преобладают естественно восстанавливающиеся леса с заниженной биомассой (Novichonok et al., 2012), поэтому добавочный углерод мог бы поступать в биомассу. Тогда в будущем постепенно размер стока должен сокращаться.

В Кат Тьене довольно значительный отрицательный *NEE*, превышающий средние оценки тропических лесов, по-видимому, связан с каким-либо видом нестационарности. Это может быть нарушение структуры леса, природное либо антропогенное, или ответ на изменяющиеся параметры внешней среды, например, увеличение осадков сухого сезона либо увеличение концентрации CO₂ в атмосфере («CO₂-fertilization»). Ответ тропического леса на рост концентрации CO₂ зависит от доступности питательных элементов в почве (Chambers et al., 2004); молодость почвы Кат Тьена и высокая ее обогащенность азотом (И. Курганова, Т. Мякшина, личное сообщение) и фосфором (Аничкин, 2008) указывают на возможность значительного роста валовой первичной продукции с улучшением условий.

Измерения потоков метана, летучих органических соединений и выноса углерода со стоком позволит замкнуть полный углеродный баланс экосистемы с внешней средой. Тем не менее, оценки выноса углерода из тропического леса с летучими органическими веществами и растворенными формами углерода вместе, если судить по измерениям в других тропических лесах, дают сток в

размере не больше $150 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Поэтому сток углерода в Кат Тьене в размере $400 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ не может быть объяснен без привлечения гипотезы о нестационарности экосистемы.

Сезонная динамика и годовые суммы валовой первичной продукции (GPP) и экосистемного дыхания (Reco). Сезонный ход валовой первичной продукции леса Кат Тьен был подробно рассмотрен в работе (Новичонок, 2013). Были отмечено, что месячные суммы валовой первичной продукции колебались от 150-200 в конце сухого сезона до 300-350 г С м^{-2} во влажный сезон. Величины во влажный сезон были сходны или даже меньше сумм для широколиственных лесов в период активной вегетации. Таким образом, высокая годовая продуктивность в сезонно-влажном тропическом лесу, как и в постоянно-влажных, достигалась не за счет высокой продуктивности, а за счет круглогодичной вегетации (Новичонок, 2013);

По алгоритму фракционирования потоков (Reichstein et al., 2005), в целом за 2012 г. валовая первичная продукция составила $3446 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, дыхание – $3035 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$; за 2013 г. валовая первичная продукция составила $3317 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, дыхание – $2988 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Данные оценки сходны с оценками для других тропических лесов (первичная продукция и дыхание составляют 3-4 $\text{кгС м}^{-2} \text{ год}^{-1}$) (Malhi, 2012).

Во второй половине сухого сезона как валовая первичная продукция, так и дыхание экосистемы снижались до 56-63 % от влажного сезона (отношение среднего значения за два месяца в пике сухого сезона к среднему значению за два месяца во влажный сезон), что позволяет говорить о периоде «сравнительно низкой активности» растительности; чем засушливее сезон в целом, тем ниже активность. Тем не менее, суммы первичной продукции в сухой сезон остаются достаточно высокими за счет фотосинтезирующих деревьев 2-4 подъярусов.

Суточный ход потоков углекислого газа. Нетто-обмен углерода (*NEE*) является разницей двух величин – дыхания экосистемы (*Reco*) и валовой первичной продукции (*GPP*). Ночью *NEE* положителен, экосистема является источником CO_2 , выделяемого в процессе дыхания. Днем *NEE* отрицателен,

экосистема является стоком углекислого газа, т.к. валовая первичная продукция (поглощение углекислого газа в процессе фотосинтеза) «перевешивает» дыхание экосистемы (Рисунок 13). В Кат Тъене значения нетто-обмена углерода ночью держались на уровне $5-8 \text{ мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а днем достигали $-15...-20 \text{ мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Суточный баланс углерода экосистемы зависит от соотношения площадей под ночной (положительной) и дневной (отрицательной) частью графика. К примеру, в апреле 2013 г. (Рисунок 13, а) площади под положительным и отрицательным участком графика были практически равны, что обусловило среднемесячный баланс углерода экосистемы, близкий к нулю. В тропиках достаточно короткий световой день (около 12 ч), значительна продолжительность ночи, на протяжении которой экосистема только выделяет CO_2 .

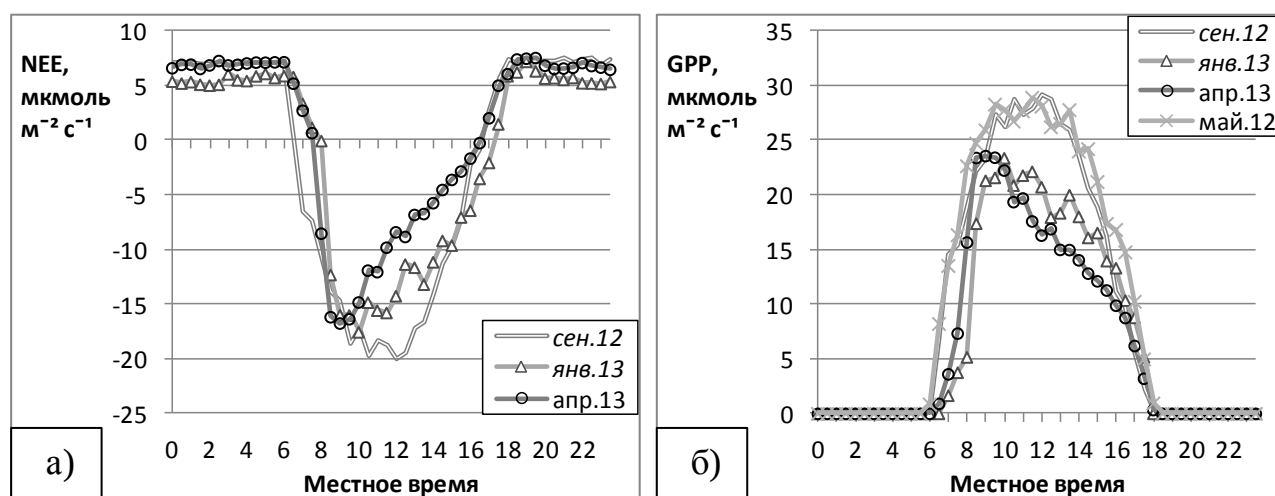


Рисунок 13 – Суточный ход в характерные периоды года - пик влажного сезона (сентябрь 2012 г.), первую половину сухого сезона (январь 2013 г.), вторую половину сухого сезона (апрель 2013 г.) и первую половину влажного сезона (май 2012 г.):

- а) нетто-обмена углерода экосистемы (NEE);
- б) валовой первичной продукции экосистемы (GPP)

Ночное дыхание экосистемы в постоянно-влажных тропических лесах сохраняется на уровне $8-9.5 \text{ мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Kosugi et al., 2012; Araújo et al., 2002; Chambers et al., 2004). Так, в постоянно-влажном лесу Пасо (Малакка,

Малайзия) дыхание тропического высокоствольного леса изменялось в течение всего года от 8.5 до 9.5 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Kosugi et al., 2012).

Для нетто-обмена углерода во влажных тропических лесах валовая первичная продукция играет большую роль, чем дыхание экосистемы, которое остается в течение года приблизительно на одном уровне. Во влажный сезон в Кат Тьене наблюдается та же закономерность: дыхание ночью также поддерживается на уровне 8-9 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, однако за счет высокой валовой первичной продукции сохраняется значительный сток углерода. Во второй половине сухого сезона же наблюдалось значительное снижение уровня ночного дыхания – приблизительно до 5 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Среднее ночное значение $NEE=Reco$ за влажный сезон 2012 и 2013 гг. составило 8.7 и 8.3 мкмоль $\text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, соответственно; за первую половину сухого сезона 2012 и 2013 гг. 5.7 мкмоль $\text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, за вторую половину сухого сезона (март 2012 г., март-апрель 2013 г.) 6.1 мкмоль $\text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Аналогичный ход дыхания экосистемы зафиксирован в муссонном, переменновлажном тропическом лесу Сишуанбаньна в южном Китае (Zhang et al., 2006). Таким образом, благодаря более низкому дыханию в сухой сезон сумма экосистемного дыхания в Кат Тьене за год оказывается ниже сумм $Reco$ в постоянно-влажных тропических лесах мира.

Валовая первичная продукция, полученная по алгоритму фракционирования потоков (Reichstein et al., 2005), во влажный сезон в среднем за месяц в предполуденные 30-минутные интервалы достигала значений 27-29 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$; среднее значение за день достигало 10-15 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Это значительно выше, чем в Сишуанбаньне (среднее значение 8 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$; Zhang et al., 2006). Однако в постоянно-влажных лесах Амазонии GPP обычно выше, что сходится с общей закономерностью увеличения GPP от сухих к влажным тропическим лесам (Brown, Lugo, 1982). На станциях K34 и C14 в Амазонии NEE днем опускалось до -25 и -30 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, соответственно (Araújo et al., 2002). Однако, есть и близкие к Кат Тьену оценки продукции в Амазонии и Юго-Восточной Азии. Во влажном тропическом лесу во Французской Гвиане GPP среднее значение за день в

течение всего года колебалось на уровне 9.5-11.5 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Bonal et al., 2008). На станции KM83 (Пара, Амазония) дневные значения *NEE* достигали 20 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Goulden et al., 2004). В влажном тропическом лесу на Борнео (Малайзия) дневные значения *NEE* достигали 17-20 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Helfter et al., 2009). Таким образом, значения валовой первичной продукции во влажный сезон в Кат Тьене находились на нижней границе оценок для влажных тропических лесов.

Значимые суммы валовой первичной продукции появлялись через полчаса-час после восхода солнца; в мае (почти максимальная продолжительность дня) - в 6:00-6:30 утра, в декабре-январе – в 6:30-7:30. Фотосинтез практически прекращался в 18-19 ч.

На Рисунке 13 хорошо видна еще одна особенность потоков нетто-обмена углерода и валовой первичной продукции в Кат Тьене. По мере прогрессии сухого сезона в дневное время все больше растет *NEE* (лес становится все меньшим стоком углерода), а также снижается *GPP*, хотя в утренние часы *NEE* и *GPP* достаточно велики по модулю. В сухой сезон наблюдалась значительная депрессия фотосинтеза в полуденные и вечерние часы, усиливающаяся по мере увеличения засушливости и роста температуры.

В самые сухие месяцы пик валовой первичной продукции наблюдался в 9 ч утра, а дальше следовало ее постепенное снижение. Максимальное значение *GPP* за день достигало 81 % от максимального значения в пике влажного сезона, что говорит о сохраняющемся значительном листовом индексе и высокой интенсивности фотосинтеза даже в пике сухого сезона. Однако в марте пиковые значения держались всего час, в то время как летом они сохранялись в течение четырех часов.

Как отмечает А. Новичонок (Новичонок, 2013), во второй половине дня интенсивность фотосинтеза ниже, чем в первой, даже во влажный сезон – при одной и той же сумме *ФАР* во второй половине дня валовая первичная продукция была ниже. Возможно, это связано с понижением концентрации CO_2 в воздухе над лесом.

Зависимость нетто-обмена углерода (*NEE*), валовой первичной продукции (*GPP*) и дыхания экосистемы (*Reco*) от внешних факторов. Наиболее сильная зависимость потоков углерода, по измерениям в 2011-2014 гг. в Кат Тьене, была выявлена от трех параметров: солнечной радиации, температуры и объемной влажности почвы на 5 см глубины.

Отрицательная корреляция с *NEE* (на среднесуточных значениях с вычтенным сезонным трендом) отмечена во влажный сезон для радиационного баланса, суммарной радиации, фотосинтетически активной радиации (в 2012 г. соответственно -0.53, -0.54, -0.52; в 2013 г. соответственно -0.58, -0.52, -0.43¹⁸). Во сухие сезоны корреляции *NEE* с радиационными характеристиками значительно снижаются; значимой остается только корреляция с радиационным балансом. Это означает, что при увеличении солнечной радиации при достаточном увлажнении увеличивался сток углерода из атмосферы в растения.

Когда влажность почвы низкая (10 % по объему), *NEE* понижается (усиливается сток углерода) только при повышении радиационного баланса до 500 Вт м⁻², а дальнейшее повышение радиационного баланса вызывает обратное повышение *NEE* (смещение в сторону источника). Чем больше влаги в почве, тем большую сумму радиации готова «выдерживать» экосистема. Так, при средней влажности около 25 % об. самый интенсивный сток наступал уже при 600 Вт м⁻², а в пик влажного сезона, при самой высокой влажности – максимальный сток вызывал радиационный баланс уже порядка 800 Вт м⁻². В целом, наибольший сток углерода наблюдался в условиях высокой влажности почвы (30-40 % об.), обильном поступлении солнечного света и температуре 26-32 °C (Рисунок 14, Рисунок 15).

В целом за весь период зависимость *NEE* от температуры воздуха и влажности почвы была ниже порога значимости, что обусловлено нелинейными связями между указанными метеорологическими параметрами и нетто-обменом углерода (Рисунок 15).

¹⁸ Для всех приведенных коэффициентов корреляции рассчитанный порог значимости ($\alpha=0.05$) составлял 0.2.

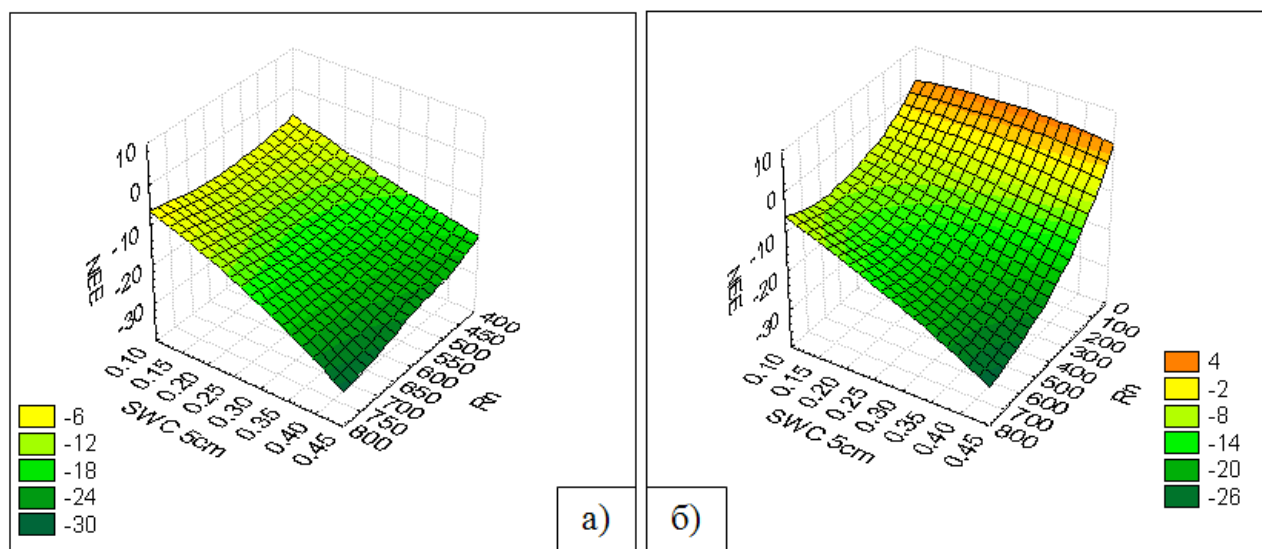


Рисунок 14 – Зависимость дневного нетто-обмена углерода (NEE , $\mu\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$) от радиационного баланса (Rn , в Вт м^{-2}) и влажности почвы на 5 см глубины (SWC , объемные доли):

а) в середине дня (при суммарной радиации больше 400 Вт м^{-2});

б) в течение всего дня (при суммарной радиации больше 20 Вт м^{-2})

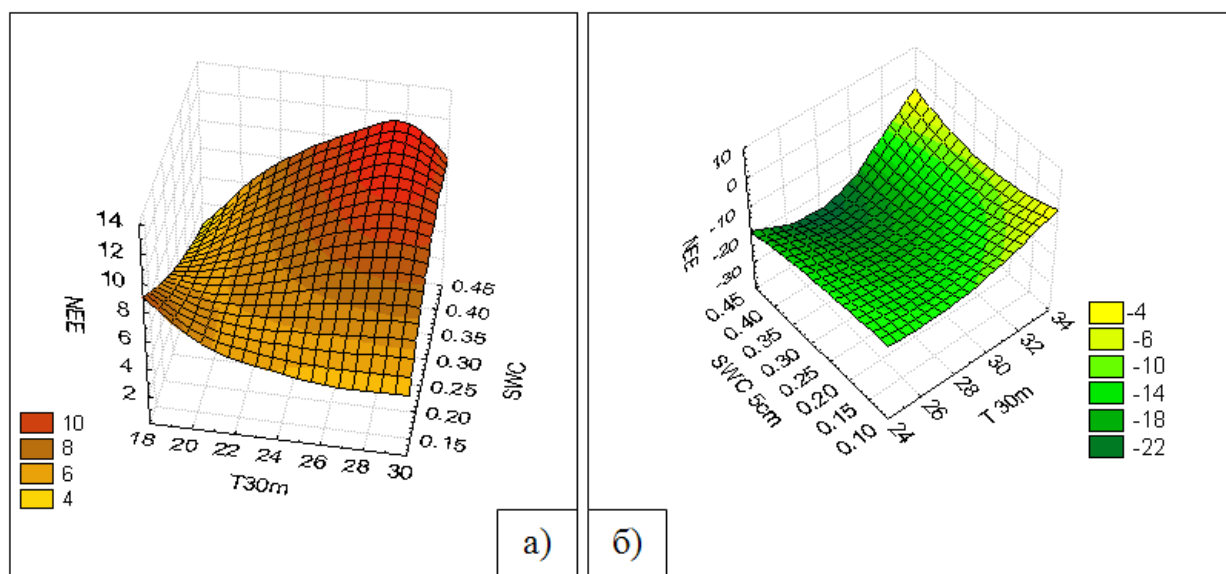


Рисунок 15 – Зависимость нетто-обмена углерода экосистемы (NEE) от температуры ($T30m$) и влажности почвы на 5 см глубины в долях объема (SWC):

а) ночью (когда $NEE = Reco$), т.е. при суммарной радиации меньше 20 Вт м^{-2} ;

б) в середине дня (при суммарной радиации больше 500 Вт м^{-2})

Световой компенсационный пункт (СКП) для всей экосистемы (уровень радиации, при котором валовая первичная продукция равна дыханию экосистемы, т.е. все органическое вещество, полученное в процессе фотосинтеза, расходуется на дыхание, $NEE=0$), зафиксирован при ΦAP около $200 \mu\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$, суммарной

радиации около 110 Вт м^{-2} (Рисунок 16) и радиационном балансе около 55 Вт м^{-2} . СКП было бы вернее считать только для автотрофов (не учитывать гетеротрофное дыхание почвы), но разделение дыхания экосистемы на автотрофное и гетеротрофное в Кат Тъене остается предметом дальнейших исследований.

Выход световой кривой NEE на плато по данным за 2.5 года наблюдался при ΦAP около $800 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, суммарной радиации около 600 Вт м^{-2} и радиационном балансе около 500 Вт м^{-2} (Рисунок 16). Данные значения легко достигаются весь год: в среднем во влажный сезон с 8-8:30 до 15 ч и в сухой сезон с 8:00 до 16:30.

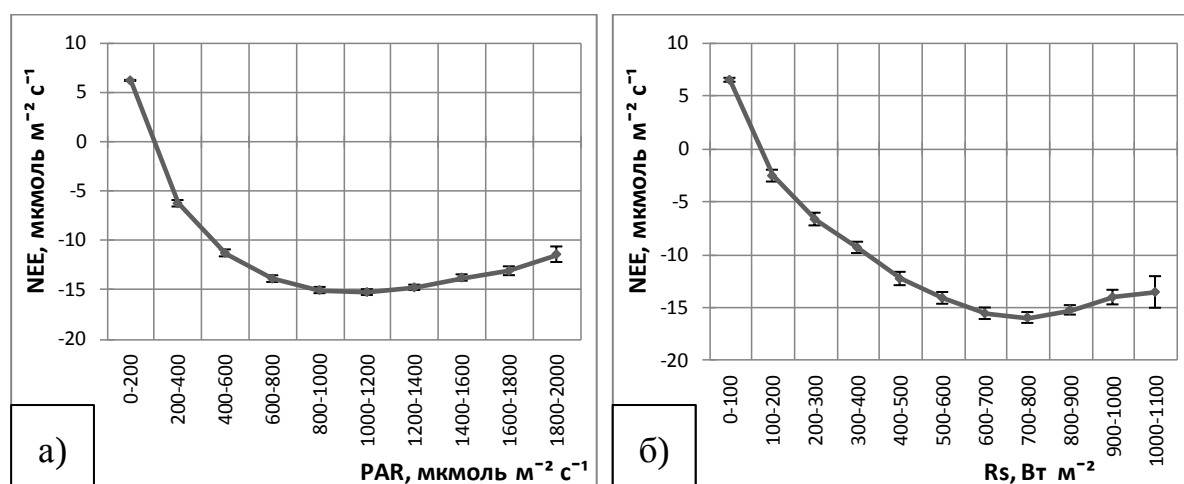


Рисунок 16 – Световые кривые нетто-обмена углерода экосистемы (NEE):
а) в зависимости от фотосинтетически активной радиации (PAR);
б) в зависимости от суммарной радиации (Rs).

Повышение NEE при высоких значениях ΦAP и суммарной радиации в некоторой степени обусловлено воздействием других факторов, таких как температура и разность водных потенциалов листа и воздуха; на графике воздействие других факторов не учтено

Ночью высокое дыхание экосистемы было отмечено в условиях высокой влажности (35 % об.) и высокой температуры (26-30 °C). Низкое дыхание было характерно для условий либо низкой влажности почвы в сочетании с высокой температурой, либо, наоборот, низкой температуры в сочетании с высокой влажностью. Следовательно, оптимальны для ночного дыхания условия, когда

влажность и температура изменяются синхронно – либо оба параметра относительно высоки, либо оба относительно низки.

Отдельно во влажный сезон не выявлено зависимости ночного дыхания экосистемы (ночного нетто-обмена) от температуры и влажности, так как изменения температуры и влажности (особенно в почве) были, по сути, небольшими. Ночное дыхание значимо менялось только в сезонном ходе. При сравнении с постоянно-влажным тропическим лесом Пасо в Малайзии (Kosugi et al., 2012) четко прослеживается характерная черта потоков углерода муссонного тропического леса: существенное понижение дыхания экосистемы в сухой сезон, связанное, в первую очередь, с сухостью почвы. Даже увеличение температуры до максимальной в самые жаркие месяцы во второй половине сухого сезона не способно значительно увеличить активность почвенных микроорганизмов-деструкторов, которым требуется влага для жизнедеятельности.

В дневное время температурный компенсационный пункт (температура, при которой валовая первичная продукция равна дыханию экосистемы, т.е. все органическое вещество, полученное в процессе фотосинтеза, расходуется на дыхание) для всего спектра влажности почвы составил 35-36 °С.

Как и следовало ожидать, валовая первичная продукция сильно зависела от радиационных характеристик. Коэффициент корреляции (на среднесуточных значениях с вычтенным сезонным трендом) *GPP* с радиационным балансом, суммарной радиацией и фотосинтетически активной радиацией за 2012 г. составил 0.49, 0.47 и 0.44 соответственно; за 2013 г. 0.54, 0.54 и 0.40 соответственно. Во влажный сезон эти зависимости еще усиливались: *r* достигал 0.65, 0.67 и 0.64 соответственно. Для леса в целом по данным за 2.5 года зафиксирован выход кривой фотосинтеза на плато при суммарной радиации 400-500 Вт м⁻² и при *ΦAP* около 800-1000 мкмоль м⁻² с⁻¹, а при дальнейшем увеличении радиации *GPP* немного снижается (Рисунок 17). Значения, при которых фотосинтез выходит на плато, достигаются достаточно легко даже во влажный сезон, что сходится с данными за 2012 г. в работе (Новичонок, 2013).

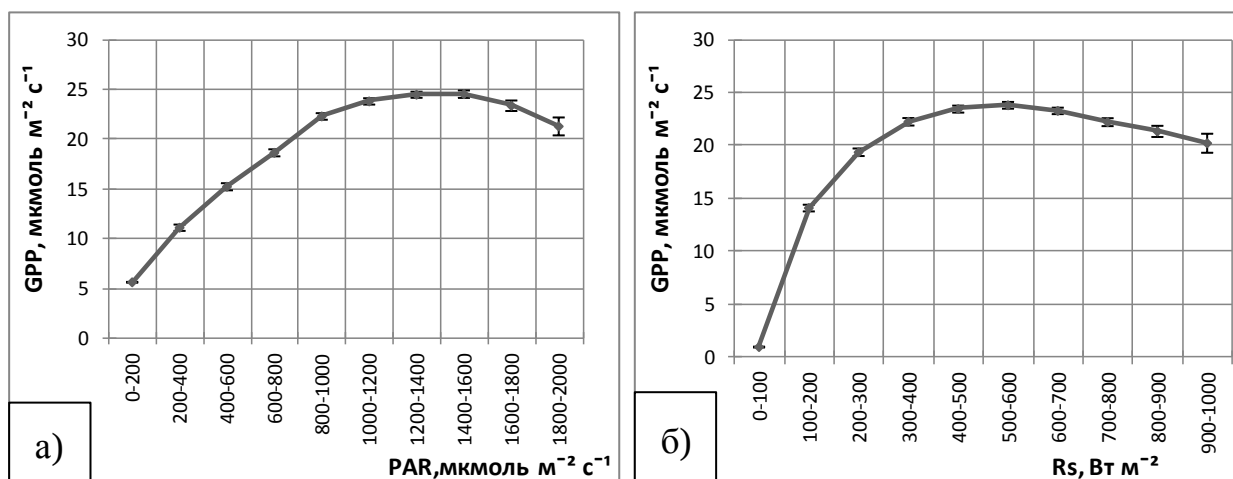


Рисунок 17 – Световые кривые валовой первичной продукции экосистемы (GPP):
а) в зависимости от фотосинтетически активной радиации (PAR);

б) в зависимости от суммарной радиации (R_s)

Снижение GPP при высоких значениях PAR и суммарной радиации в некоторой степени обусловлено воздействием других факторов, таких как температура и разность водных потенциалов листа и воздуха; на графике воздействие других факторов не учтено

Как валовая первичная продукция, так и дыхание экосистемы интенсифицировались с увеличением температуры; однако валовая первичная продукция при росте температуры выше $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинала снижаться (Рисунок 18).

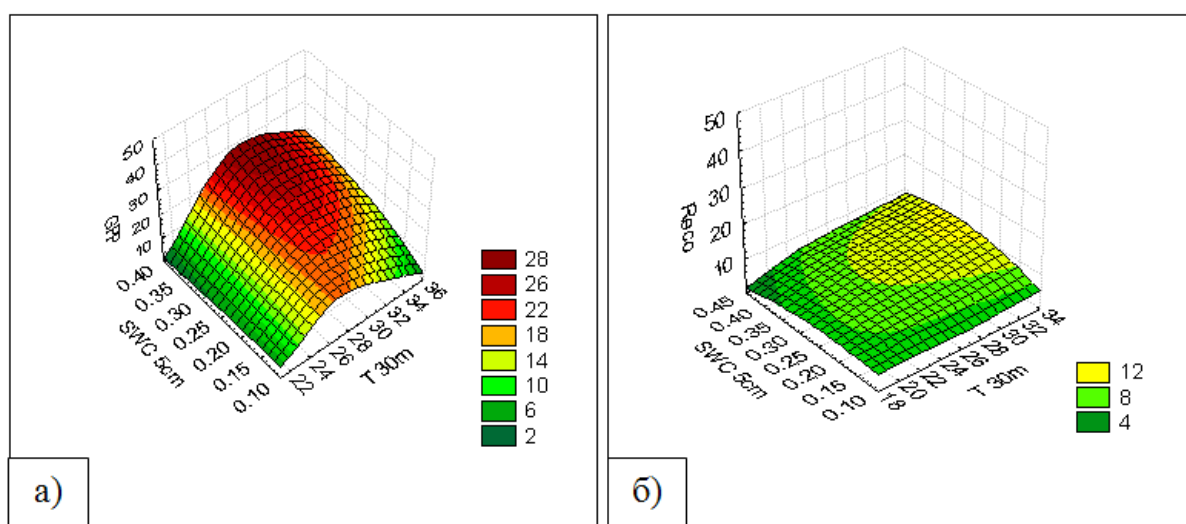


Рисунок 18 – Зависимость от температуры на 30 м ($T30m$) и влажности почвы на 5 см глубины в долях по объему ($SWC5cm$) потоков углерода экосистемы (график построен по измеренным и заполненным значениям потоков):

а) валовой первичной продукции (GPP) в дневное время, т.е. при суммарной радиации больше 20 Вт м^{-2} ;

б) дыхания – в дневное и ночное время

Основным фактором снижения дыхания в Кат Тъене в сухой сезон выступала почвенная засуха – корреляция ночного дыхания и объемной влажности почвы по суточным значениям составляла 0.27-0.37 ($\alpha < 0.01$).

Вообще, все зависимости валовой первичной продукции и дыхания экосистемы от метеорологических переменных усиливались во влажный сезон. Иными словами, процессы углеродного обмена становятся чувствительнее по отношению к изменениям температуры и влажности воздуха, если почва достаточно увлажнена. Так, только во влажный сезон была обнаружена значимая положительная корреляция *Reco* с температурой воздуха на 30 м ($r=0.23$), *Reco* с дефицитом водяного пара над лесом ($r=0.25$), *GPP* с температурой воздуха на 30 м ($r=0.53$), *GPP* с дефицитом водяного пара над лесом ($r=0.56$). Усиливающиеся зависимости потоков углерода от характеристик воздушной среды можно связать с более интенсивной жизнедеятельностью растений для формирования массообмена экосистемы во влажный сезон относительно сухого. Так, по-видимому, для суммарного дыхания экосистемы во влажный сезон меньшую роль играет почва и большую – растения. Интенсивность фотосинтеза, которая в сухой сезон сильно ограничивалась как снижением листового индекса, так и устьичным лимитированием (при низкой доступности влаги для транспирации), во влажный сезон начинает меняться в зависимости от характеристик воздушной среды. В сезонном ходе, без исключения сезонных трендов, валовая первичная продукция очень сильно зависела от влажности почвы ($r=0.59$ и 0.48 для сухого сезона 2011-2012 и 2012-2013 гг., соответственно) и от поверхностной проводимости полога ($r=0.49$ и 0.51 для сухого сезона 2011-2012 и 2012-2013 гг., соответственно; см. главу 5).

Следует отметить, что дыхание экосистемы в сухой сезон интенсифицировалось при увеличении влажности почвы, а во влажный сезон, напротив, понижалось при самой высокой влажности – в условиях, когда почва была затоплена водой. Таким образом, выявлен оптимум почвенной влажности для процесса дыхания экосистемы – объемная влажность почвы должна

составлять от 0.2 до 0.4. Как чрезмерно низкая, так и чрезмерно высокая влажность почвы приводили к одному и тому же результату – понижению *R_{eco}*. Низкое дыхание в условиях затопления почвы водой обусловлено тем, что для эффективного разложения органики требуется кислород. В сухой сезон дыханию экосистемы «важна» только влажность почвы, зависимость от температуры слабая. Во влажный сезон дыхание экосистемы, если рассматривать и дневные, и ночные значения, снижалось только при температуре ниже 24 °C, т.е. в утренние часы, а во всем остальном возможном спектре изменений температуры и влажности оставалось приблизительно на одном уровне.

Выводы по разделу. Годовая оценка нетто-обмена углерода леса в Кат Тьене с атмосферой (*NEE*) сильно зависела от алгоритма заполнения пропусков.

Для оценки среднего годового *NEE* был использован стандартный метод заполнения пропусков с помощью нелинейных регрессий в сочетании с методом значений в аналогичных условиях (look-up tables) в онлайн-инструменте сайта Института Макса Планка (MPI), Германия (Reichstein et al., 2005).

В итоге, муссонный тропический лес Кат Тьена оказался стоком углерода из атмосферы; $NEE = -402 \pm 20$ грамм углерода на метр квадратный в год ($\text{г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$) в 2012 г. и $-453 \pm 14 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ в 2013 году.

Так как годовая сумма *NEE* по определению оценивается по случайной выборке из реальных значений, имеющей к тому же большой процент пропусков, то эта сумма представляет собой вероятностную величину. Спектр годовых сумм, полученных при использовании других возможных методов на всех этапах обработки, можно считать спектром вероятных значений *NEE* за год. Поэтому целесообразнее говорить о более вероятной и менее вероятной величине годового *NEE*. Осторожность формулировок нельзя считать лишней, если учитывать ступенчатость и сложность алгоритмов для получения окончательных интегральных значений.

Предлагается ввести ансамблевую¹⁹ оценку годовых сумм нетто-обмена углерода – оценку, полученную с использованием различных расчетных алгоритмов с анализом их применимости в данных условиях и сравнением результатов между собой. Ансамблевая оценка годовых сумм в пульсационном методе сталкивается с рядом методических трудностей. Например, не ясно, как вводить в ансамбль величины, полученные на разных этапах работы с данными, например, годовые суммы при различном пороге турбулентности – и годовые суммы с использованием различных методов заполнения пропусков. Настоящая ансамблевая оценка, с использованием весов для каждого метода и с получением вероятностной функции для годового *NEE*, выходит за рамки данной работы, но вместо единственной оценки адекватнее указывать «стандартную» оценку (стандартный алгоритм), «устойчивую» оценку (алгоритм, устойчивый к большой доле ночных пропусков), а также диапазон значений, полученных с помощью разных методов.

Так, в Кат Тьене наиболее вероятное значение *NEE* («стандартная оценка») для 2012 г. будет равно -402 ± 20 г С м⁻² год⁻¹, для 2013 г. -453 ± 14 г С м⁻² год⁻¹. Диапазон возможных годовых значений для 2012 г. составил от -296 до -581 г С м⁻² год⁻¹ (80 % полученных значений лежит в диапазоне от -340 до -530 г С м⁻² год⁻¹). Наиболее устойчивым к большому проценту пропусков ночных значений, очевидно, 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 г С м⁻² год⁻¹ за 2012 г. и -381 г С м⁻² год⁻¹ за 2013 год.

Как видно из приведенных данных, при всем широком разбросе значений не вызывает сомнений факт наличия в Кат Тьене в 2012 и 2013 гг. большого отрицательного нетто-обмена углерода, около -400 ± 100 г С м⁻² год⁻¹ (экспертная оценка точности расчета) – т.е. лес в целом поглощал углерод из атмосферы. Тем

¹⁹ Ансамблевым прогнозом в климатологии называется прогноз состояния климата, состоящий из спектра возможных будущих состояний; различные прогнозы получают с помощью целого ряда (ансамбля) метеорологических численных моделей и затем сравнивают результаты между собой.

не менее, неопределенность размера стока велика, и особенно она зависит от оценок ночного дыхания экосистемы. Для снижения неопределенности необходимы дополнительные камерные измерения дыхания элементов растительности и почвы с экстраполяцией на экосистемный уровень (по Chambers et al., 2004).

Средние оценки баланса углерода тропических лесов по учетам биомассы в 1990-2000-е годы составляли около -130 ± 0 г С м⁻² год⁻¹ (Phillips et al., 1998; Malhi, Grace, 2000; Ciais et al., 2008; Lewis et al., 2009a). Результаты пульсационных измерений во многих случаях совпадали с величинами, полученными биометрическим методом (Sajgusa et al., 2008), однако на некоторых станциях *NEE*, рассчитанный по стандартной методике, оказывался значительно ниже; леса были большими стоками углерода (Malhi et al., 2009a; Tan et al., 2010; Rowland et al., 2014). В целом, в Кат Тьене сток углерода больше средних величин для тропических лесов, но не является исключительным. От четверти до трети стока, скорее всего, обусловлено вымыванием 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, по-видимому, в Кат Тьене поступает в почву и биомассу.

Наиболее вероятной причиной значительного стока углерода в Кат Тьене стоит назвать какой-либо вид нестационарности – либо биологическую нестационарность (восстановление леса после нарушений, выборочных рубок в прошлом столетии), либо специфический сильный отклик экосистемы на изменение климата (повышение осадков в сухой сезон), либо специфический сильный отклик на изменение газового состава атмосферы (увеличение количества CO₂). Сильный отклик экосистемы на улучшение условий среды возможен, если отсутствует лимитация по питательным элементам в почве (в первую очередь по азоту и фосфору). В принципе, в Кат Тьене это условие может выполняться, так как почвы Кат Тьена – вулканические, относительно молодые и

богатые азотом и фосфором по сравнению с древними латеритными почвами, преобладающими на равнинах влажных тропиков.

Можно перечислить следующие выводы по зависимостям углеродного обмена от внешних факторов:

- наиболее сильное влияние на нетто-обмен углерода и валовую первичную продукцию в Кат Тъене в 2011-2014 гг. из всех метеорологических переменных оказывали радиационные характеристики, в первую очередь – радиационный баланс. Во влажный сезон повышение интенсивности солнечной радиации вызывает особенно интенсивное поглощение углекислого газа лесом;

- в сухой сезон валовая первичная продукция и дыхание экосистемы наиболее зависели от влажности почвы, и постепенно снижались с усилением засухи;

- нетто-обмен углерода был отрицательным и большим (сток углерода из атмосферы в экосистему максимален) в следующих условиях: высокая влажность почвы (63-83 % по объему от полной вместимости), обильное поступление солнечного света (суммарная радиация около 800 Вт м^{-2}) и температура 26-32 °С. Такие условия были характерны для середины дня с переменной облачностью/без облаков с июня по октябрь, т.е. во влажный сезон за исключением одного-двух начальных месяцев;

- выход на световое плато кривой фотосинтеза леса в условиях засухи наблюдался при более низких значениях суммарной радиации, чем условиях хорошей обеспеченности влагой; в среднем, выход на плато наблюдался при ΦAP 800-1000 $\text{мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$;

- во влажный сезон дыхание экосистемы ($Reco$) муссонного тропического леса было близким к дыханию постоянно-влажных тропических лесов, а в сухой сезон $Reco$ значительно снижалось примерно на 30 % вследствие почвенной засухи (и связанного с ней снижения листового индекса и активности почвенных микроорганизмов);

- световой компенсационный пункт для всего леса наблюдался при суммарной радиации около 110 Вт м^{-2} и радиационном балансе около 55 Вт м^{-2} ,

т.е. примерно в 7 и 16 ч (через час-полтора после восхода солнца утром и за час-полтора перед закатом); температурный компенсационный пункт для всего леса наблюдался при 35-36 °C, т.е. только в полуденные часы самых жарких дней года;

– во влажный сезон при оптимальной влажности почвы были отмечены зависимости валовой первичной продукции и дыхания экосистемы от температуры в пологе леса и дефицита водяного пара над лесом: потоки углерода интенсифицировались при росте температуры и дефицита водяного пара.

В целом, за 2012 г. валовая первичная продукция составила $3446 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, дыхание – $3035 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$; в 2013 г. валовая первичная продукция составила $3317 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, дыхание – $2988 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Оценки валовой первичной продукции находятся в границах диапазона оценок для тропических лесов мира, где первичная продукция составляет $3000\text{-}4000 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (Malhi, 2012). Экосистемное дыхание находится на нижней границе оценок для тропических лесов мира вследствие наличия сухого сезона, сильно понижающего дыхание. Для деревьев тропического леса в Бразилии было показано, что виды поздних стадий сукцессии имеют более высокие уровни фотосинтеза и транспирации на единицу площади листа, чем виды ранних фаз сукцессии (Nogueira et al., 2004). Поэтому, если верна гипотеза о восстановлении после нарушений, первичная продукция и транспирация леса в Кат Тьене может постепенно увеличиваться в будущем.

В самые жаркие месяцы (апрель 2012, 2013 и 2014 гг.) баланс углерода тропического сезонно-влажного леса оказывался немного больше нуля (лес становился слабым источником углерода). Повышение *NEE* в конце сухого сезона связано с самой высокой в году температурой и соответствующим увеличением дыхания экосистемы, а также снижением валовой первичной продукции. Тем не менее, в сухой сезон относительно влажного сезона большая сухость почвы сильно снижает дыхание экосистемы, и эффект сухости почвы столь же важен для процесса деструкции, как эффект роста температуры.

В начале сухого сезона увеличивалось дыхание экосистемы, что в 2011 г. привело к близким к нулю значениям *NEE*. По-видимому, более интенсивное

дыхание связано с высыханием многочисленных мелких водоемов и луж и разложением накопившегося в них органического вещества.

Во влажный сезон и в середине сухого сезона *NEE* оставался отрицательным (лес поглощал углекислый газ из атмосферы). В сухой сезон как первичная продукция, так и дыхание экосистемы снижались до 58-65 % от влажного сезона, что позволяет говорить о периоде «сравнительно низкой активности» растительности; чем засушливее сезон, тем ниже активность. Тем не менее, валовая первичная продукция в сухой сезон остается достаточно высокой за счет фотосинтезирующих деревьев 2-4 подъяруса и травянистых растений.

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

В данной главе рассмотрена связь четырех балансов экосистемы муссонного тропического леса – радиационного, теплового, водного и углеродного, – на примере Кат Тьена. Рассмотрена эффективность использования климатических ресурсов экосистемой. Внимание уделяется проводимости поверхности – важному параметру, связывающему водный и углеродный обмен экосистемы. Найдены параметры среды, лимитирующие энерго- и массообмен экосистемы в различные периоды года. Также выявлены характеристики экосистемы, играющие ключевую роль в энерго- и массообмене. Заключительная гипотеза касается изменений энерго- и массообмена экосистемы сезонного тропического леса при нарушениях.

Общие замечания. Соотношение осадков и потенциального суммарного испарения обуславливает тип естественной экосистемы, развивающейся на данной территории (Григорьев, Будыко, 1956).

Структура и функции естественных экосистем внутри биома зависят от количества, сочетания и сезонности поступления природных ресурсов – солнечной радиации, тепла, влаги, питательных элементов (по Одуму, 1986 и Polis, 1999). Насколько условия среды благоприятны для возникновения и функционирования экосистемы, зависит не только от обеспеченности теплом и влагой по отдельности, но и в соотношении ресурсов тепла и влаги. В анализе продуктивности лесов часто применяют комплексные показатели, учитывающие не только осадки (как вариант – влажность), но и температуру (либо солнечную радиацию). Примерами таких показателей являются: гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова (Селянинов, 1933), радиационный индекс сухости М. И. Будыко (Григорьев, Будыко, 1956), индекс CVP С. Патерсона (Paterson, 1956), биоклиматический потенциал Д. И. Шашко (Шашко, 1985). В тропических

условиях, когда вегетация продолжается круглогодично, важно оценить соотношение тепло- и влагообеспеченности в разные периоды года. Для формирования экосистемы роль играет также возможность накопления ресурсов, особенно влаги и питательных элементов (Одум, 1986).

В свою очередь, вертикальные исходящие потоки тепла, влаги, газовых примесей в атмосферу формируются в зависимости от свойств растительности и почвы и интенсивности происходящих в экосистеме процессов. Полученная экосистемой солнечная радиация частично отражается (что зависит от отражательных свойств растительного полога), частично расходуется на фотосинтез (E_{ph}^{20}), частично поглощается пологом и открытой почвой либо водоемами. Пришедшая из атмосферы тепловая радиация нагревает поверхность. Нагретые элементы растительности, почва и водоемы излучают тепловую радиацию обратно в атмосферу. Оставшаяся тепловая энергия ($R_n - E_{ph}$) расходуется на испарение (LE), турбулентный нагрев атмосферы (H), нагрев растительного полога и почвы ($E_{st} + G$). Пропорция тепловой энергии на нагрев атмосферы/на испарение (отношение Боуэна) зависит от наличия доступных ресурсов влаги, от влагопроводящих и влагоудерживающих свойств почвы и растений, в т.ч. от скорости стекания влаги в грунтовые воды и от интенсивности транспирации. Цикл углерода определяется интенсивностью процессов продукции и деструкции органического вещества, т.е. фотосинтеза и дыхания экосистемы (Valentini et al., 2000; Falge et al., 2002), которые, в свою очередь, зависят от множества внешних условий, а также от внутренней биологической регуляции самих растений. К внешним условиям относятся интенсивность солнечной радиации, температура, влажность, доступность питательных элементов и так далее (Farquhar, Von Caemmerer, 1982; Yiqi, Zhou, 2010). Биологическая регуляция отражает реакцию растений на изменения внешних условий. К реакциям можно отнести изменение структурных характеристик (листового индекса; количества тонких корней и др.), химизма (обводненность

²⁰ Обозначения даны в тех случаях, когда облегчают изложение.

элементов растений; запас питательных веществ; минеральный состав), гормональную регуляцию (выработку фитогормонов), а также изменения устьичной проводимости – степени открытости устьиц на листовых пластинках. Биологическая реакция также изменяется в связи с наличием или отсутствием болезней растений.

Обмен влагой между растением и атмосферой в основном осуществляется через устьица. Помимо устьичной транспирации также существует кутикулярная транспирация (испарение воды через кутикулу листа и побегов), однако у взрослых листьев кутикулярная транспирация незначительна, а у молодых составляет всего до 10 % от всей транспирации (Веретенников, 2006). Только в засушливые периоды, когда устьица закрыты, кутикулярная транспирация может приобретать большой вес. Обмен углекислым газом также осуществляется через устьица. Поэтому устьичная проводимость влияет как на влагообмен, так и на углеродный обмен растения. Интегральная устьичная проводимость для всех растений всех ярусов называется объемной проводимостью полога (Kelliher et al., 1995). Структурные характеристики растительного полога и его проводимость зависят от метеорологических условий.

Если суммировать, радиационный баланс с тепловым в экосистеме связывает альбедо, а также теплоемкость и теплопроводность деятельной поверхности. Возможность расхода полученной энергии на суммарное испарение и турбулентный поток тепла при заданном радиационном балансе зависит от количества доступной влаги, проводимости полога и влагоудерживающих/влагопроводящих свойств растительности и почвы. Потоки влаги и углекислого газа связаны через структурные характеристики биоценоза и проводимость полога.

5.1. Эффективность использования ресурсов в экосистеме

Эффективность использования ресурсов в экосистеме (Sheriff et al., 1995; Funk, Vitousek, 2007) обычно определяется как затрата ресурса на единицу произведенной продукции (т.е. органического вещества). Однако в данной главе понятие эффективности употребляется в расширенном смысле – оно распространяется и на радиационные, тепловые и водные потоки; под эффективностью понимается соотношение использованного, преобразованного экосистемой/входящего потока.

Эффективность преобразования солнечной энергии в тепловую, или та часть коротковолновой нисходящей (т.е. солнечной, или суммарной) радиации, которая преобразуется в радиационный баланс, зависит от отражательной способности поверхности (альбедо). Чем ниже альбедо, тем больше солнечной энергии поглощается и становится ресурсом экосистемы для энерго- и массообмена. Ход альбедо (см. Рисунок 4 раздела 3.2) в полулистопадном лесу Кат Тьена определялся сезонным ходом листового индекса и соотношением молодых/старых листьев в пологе. По косвенным оценкам (фотографии лесного полога, количество листового опада), листовый индекс увеличивался в июне-сентябре и снижался в декабре-апреле (см. раздел 2.1). Альбедо леса изменялось в годовом ходе слабо, от 10.5 % в сентябре до 12.0 % в марте; в среднем, эти изменения выразились изменении радиационного баланса всего на 3 %. Для сравнения, в других переменнно-влажных и влажных тропических лесах альбедо изменялось в среднем от 11 до 14 %, хотя максимальное среднемесячное альбедо леса Вале в Амазонии достигало 16.5 (см. Таблицу 3 раздела 3.2). В полностью листопадных лесах при опавших листьях альбедо выше. Так, для плантации гевеи в Южном Китае было характерно альбедо около 12 % при распустившихся листьях и резкий рост до 20 % во второй половине сухого сезона при голых ветвях (Guardiola-Claramonte et al., 2008).

Таким образом, альbedo в муссонном лесу Кат Тьена по измерениям за 2011-2014 гг. оказывалось низким и обладало слабым сезонным ходом, результат был похож на влажные тропические леса. Иными словами, лес поглощал почти 90 % поступающей солнечной радиации (т.е. эффективность преобразования солнечной энергии в тепловую была почти 90 %); почва не «просвечивала» через полог леса. В целом альbedo за сухой сезон, по нашему мнению, выглядит сомнительно низким и может быть связано со специфической площадью обзора датчика радиации, заполненной в основном вечнозелеными деревьями. Для более точной информации об альbedo требуются исследования, захватывающие большую часть поверхности полога. Хотя также возможно и то, что альbedo полулистопадного леса приближается к альbedo вечнозеленого леса за счет наличия сомкнутых вечнозеленых нижних подъярусов.

Эффективность использования радиационного баланса для создания потока суммарного испарения (LE/R_n) – доля радиационного баланса (бюджета энергии), которая тратится на испарение²¹. В Кат Тьене в 2012 году в скрытое тепло уходило 77 % радиационного баланса, в 2013 году – 74 %. Таким образом, в переменном-влажном лесу Кат Тьен затраты тепла на испарение составляли в структуре радиационного баланса долю около $\frac{3}{4}$, характерную для влажных и переменном-влажных тропических лесов (Таблица 1).

Самый низкий среднемесячный показатель LE/R_n в Кат Тьене был зафиксирован в засушливые и жаркие месяцы – март 2013 г. и март 2014 года: 44 % и 40 % соответственно. Эта величина близка к оценкам для бразильской саванны Пе де Жижанти в сухой сезон (da Rocha et al., 2009). В середине влажного сезона в Кат Тьене на испарение уходило 85-87 % радиационного баланса, что близко к наибольшим оценкам для влажных тропических лесов (Vourlitis et al., 2008). Фактически, это максимально возможные показатели для наземных природных экосистем, не ограниченных по ресурсам влаги. Во влажное

²¹Термины «затраты тепла на суммарное испарение» и «скрытое тепло» - синонимы.

время еще 11-12 % от радиационного баланса уходило на явное тепло и 3-4 % – на фотосинтез.

Таблица 1 – Доля затрат тепла на суммарное испарение
в радиационном балансе

Станция	Тип леса*	Годы измерений	LE/Rn , %	Ссылка
Юго-Восточная Азия				
<i>Вьетнам</i>				
Нам Кат Тьен (Nam Cat Tien)	SE	2012-2013	75	Данная работа
<i>Китай</i>				
Сишуангбанна (Xishuangbanna)	SE	2003-2006	82	Li et al., 2010
<i>Малайзия</i>				
Пасо (Pasoh)	WE	2005-2006	70	Kosugi et al., 2011
Ламбир (Lambir Hills)	WE	2001-2002	88	Kumagai et al., 2005
Южная Америка				
<i>Бразилия</i>				
Синоп (Sinop)	WE	1990-1993	74-84	Vourlitis et al., 2008

*Типы тропических лесов: влажный вечнозеленый – WE, переменновлажный вечнозеленый – SE

Доля солнечной радиации (R_s), затрачиваемая на фотосинтез (E_{ph}/R_s).
По расчетам, выполненным в ходе данной работы, в самые сухие месяцы на фотосинтез затрачивалось²² 1.1-1.3 % суммарной радиации, во влажный сезон – 2.8-2.9 % суммарной радиации. В целях сравнения была также посчитана доля радиационного баланса (R_n), затрачиваемая на фотосинтез (E_{ph}/R_n). Для Кат Тьена она составила 1.7-2.0 и 3.5-3.8 % в сухой и влажный сезоны соответственно, в среднем 2.8 %; сравнение полученных данных с другими тропическими лесами приведено в таблице (Таблица 2).

²² В расчетах был использован коэффициент преобразования энергии 11.2 Дж мг⁻¹ CO₂ из статьи (Dou et al., 2006).

Таблица 2 – Доля затрат энергии на фотосинтез в радиационном балансе*

Станция	Тип леса**	Годы измерений	E_{ph}/R_n , %	Ссылка
Юго-Восточная Азия				
<i>Вьетнам</i>				
Нам Кат Тьен (Nam Cat Tien)	SE	2012-2013	1.7-2.0 и 3.5-3.8	Данная работа
<i>Малайзия</i>				
Пасо (Pasoh)	WE	2003-2009	2.7-3.2	Kosugi et al., 2012
Маеклонг (Mae Klong)	WE	2003-2004	3.3-3.4	Huete et al., 2008
Сакаерат (Sakaerat)	WE	2001-2003	3.9-4.2	Huete et al., 2008
<i>Индонезия</i>				
Букит Соехарто (Bukit Soeharto)	WEs	2001-2002	0.7-1.3	Huete et al., 2008
Южная Америка				
<i>Бразилия</i>				
Казиуана (Caxiuaana)	WE	1999-2003	3.3-3.7	Malhi, 2012; Carswell et al., 2002

* Расчет по базе данных ASIAFLUX

** Типы тропических лесов: влажный вечнозеленый – WE, переменновлажный вечнозеленый – SE; вторичный восстанавливающийся – S

Букит Соехарто в период измерений представлял собой вторичный лес высотой 10-12 м; все остальные упомянутые леса – первичные, высотой 30 м и более. Таким образом, доля затрат на фотосинтез в радиационном балансе в Кат Тьене была на нижней границе величин в первичных тропических лесах Юго-Восточной Азии и Амазонии за счет снижения фотосинтеза в сухой сезон.

Эффективность использования воды ($WUE = GPP/E$) – отношение валовой первичной продукции к суммарному испарению – важный показатель транспирационных издержек на единицу полученной продукции (Zhang et al., 2013).

Для муссонного тропического леса Кат Тьена наклон кривой, аппроксимирующей облако точек среднемесячных значений GPP/E за период 11.2011-04.2014, составил 6.2 г CO_2 /кг H_2O ; в целом за 2012 год $GPP_y/E_y =$

8.30±0.88 г CO₂/кг H₂O. Понтон (Ponton et al., 2002) для мелколистственного и хвойного лесов и травянистого сообщества умеренной зоны отмечал сильную отрицательную зависимость *WUE* от дефицита водяного пара в воздухе. Значимая отрицательная зависимость *WUE* от *VPD* была найдена и для Кат Тьена. Это отражает достаточно очевидную закономерность: при низком дефиците влаги (относительной влажности, близкой к 100 %) на единицу получаемой продукции тратится наименьшее количество влаги. Полученные значения *WUE* не имели выраженного сезонного хода.

Сравним среднегодовую эффективность использования воды лесом в Кат Тьене с другими тропическими лесами мира. На китайских станциях Чанбайшань (Changbaishan, CBS), Цяньянчжоу (Qianyanzhou, QYZ) и Динхушань (Dinghushan, DHS) (соответственно, умеренный широколистственный смешанный лес, субтропический хвойный лес, субтропический вечнозеленый широколистственный лес) среднее значение *WUE* составило 9.43±1.28 г CO₂/кг H₂O, 9.27±1.77 г CO₂/кг H₂O и 6.90±0.69 г CO₂/кг H₂O (Yu et al., 2008). Для влажного тропического леса Пасо (Малакка, Малайзия) с характерной валовой первичной продукцией 3000-3600 г С м⁻² год⁻¹ и суммарным испарением 1300 мм (Kosugi et al., 2012) эффективность использования воды составила 8.5-10.2 г CO₂/кг H₂O. Для станций в Амазонии с *GPP*=3000-3600 г С м⁻² год⁻¹ (Carswell et al., 2002; Malhi и Grace, 2000) и *LE*=1500-1700 мм (Fisher et al., 2009) эффективность использования воды составила 7.4-7.8 г CO₂/кг H₂O.

Таким образом, эффективность использования воды для создания продукции в тропическом муссонном лесу Кат Тьена лежит в диапазоне значений, характерных для тропических сезонных и влажных лесов. Для видов тропического леса в Бразилии было показано, что виды поздних стадий сукцессии имеют более высокую эффективность использования воды, чем виды ранних фаз сукцессии (Nogueira et al., 2004). Поэтому, если верна гипотеза о восстановлении леса в Кат Тьене после нарушений, эффективность использования воды может постепенно возрастать в будущем.

5.2. Проводимость поверхности

Суть понятия устьичной проводимости для потока транспирационной влаги можно вывести из сравнения с электрической цепью. Проводимость – величина, обратная сопротивлению листа для потока транспирационной влаги. Сопротивление есть отношение напряжения (=разности водных потенциалов листа и прилистных слоев воздуха) к силе тока (=величине транспирации). Соответственно, устьичная проводимость отдельного листа есть отношение транспирации к разности водных потенциалов листа и прилистного воздуха. Проводимость измеряется в мм с^{-1} ; днем во влажный сезон для тропического леса первая величина составляет порядка 20 мм с^{-1} . Интегральная устьичная проводимость всех листьев полога называется объемной проводимостью полога (bulk canopy conductance) и обозначается g_c (Kelliher et al., 1995). Объемную проводимость полога можно смоделировать, но ее измерения очень трудоемки. Для расчетов проводимости полога по аналогии с объемной проводимостью полога вводится поверхностная проводимость полога (surface canopy conductance) – т.н. «big-leaf» подход, при котором весь растительный полог представляется в виде одного транспирирующего листа. Сопротивление этого условного листа для потока транспирации и будет поверхностной проводимостью полога.

Поверхностную проводимость полога можно рассчитать с помощью уравнения Пенмана-Монтейта (Monteith, 1981), которое описывает зависимость испарения от метеорологических (температура и влажность воздуха, скорость ветра, доступная энергия) и биологических (проводимость полога) условий. Проводимость полога по обращенному уравнению Пенмана-Монтейта может быть рассчитана, если измеряются независимо и испарение, и метеорологические условия – как и ставится эксперимент в стандартных измерениях пульсационным методом (Oltchev, 1998; Liu et al., 2006; da Rocha et al., 2004).

Поверхностная проводимость полога – мера устьичной лимитации транспирации в экосистеме. Таким образом, величина g_c очень важна для

описания водного цикла экосистемы: она выражает биологическую регуляцию транспирации экосистемы.

В пульсационных измерениях измеряется только суммарное испарение, но не транспирация. Суммарное испарение, кроме транспирации, включает еще две основные компоненты: 1) испарение с поверхности почвы и 2) испарение перехваченных осадков, т.е. воды, испаряющейся прямо с смоченных поверхностей растений после дождя, не доходя до почвы и не проходя путь по тканям растений (раздел 4.2). На основе пульсационных данных можно рассчитать только проводимость поверхности g_s (surface conductance), но не проводимость полога. Проводимость поверхности g_s – более комплексная величина, сложнее поддающаяся интерпретации, чем проводимость полога. Различие транспирации и суммарного испарения экосистемы служит мерой приближения расчетной проводимости поверхности к проводимости полога.

Основные факторы, влияющие на раскрытие и закрытие устьиц (Веретенников, 2006) – это свет и доступность влаги (фотоактивные и гидроактивные/гидропассивные движения); также влияет разность водных потенциалов листа и воздуха, температура и химизм листа. Механизм фотоактивных движений раскрывается следующей схемой: утром на свету начинается фотосинтез, накапливается АТФ, за счет которой активизируются калиевые насосы, перекачивающие ионы калия в замыкающие устьица клетки. Внутреннее осмотическое давление (тургор) этих клеток увеличивается и устьица открываются. Согласно этой схеме, вечером при прекращении фотосинтеза устьица закрываются; однако в реальности устьица остаются частично открытыми, что обуславливает ночную транспирацию, наблюдающуюся у многих видов растений, в том числе тропических деревьев (Dawson et al., 2007). Функция ночной транспирации до сих пор не ясна; возможно, она состоит в восполнении проводящих тканей растений водой для усиления утренней транспирации и предотвращения разрыва столба жидкости днем (Pfautsch et al., 2014). Гидроактивные движения могут наблюдаться в полуденные часы, когда количество воды в замыкающих клетках снижается настолько, что устьица

закрываются. Гидропассивные движения наблюдаются в периоды сильных дождей, когда листья растений настолько насыщены влагой, что окружающие ткани сдавливают замыкающие клетки и просвет устьиц механически сужается и закрывается.

Т.к. и транспирация, и обмен CO_2 происходит через устьица и лимитируется устьичным просветом, циклы углерода и влаги наземных экосистем связаны через устьичную проводимость (Kelliher et al., 1995). С некоторым упрощением можно сказать, что параметр проводимости изменяет интенсивность интегрального газообмена экосистемы. Наиболее сильна связь потоков углерода и влаги, а также устьичная регуляция при незначительной ширине раскрытия устьичных пор. Однако для потока влаги устьичная лимитация является единственной, в то время как для фотосинтетического потока CO_2 существует еще один, более значимый, барьер. «Устьица листа представляют для транспирационного потока единственный значимый управляемый механизм, в то время как усвоение CO_2 дополнительно к диффузии газов испытывает при полном раскрытии устьиц еще одно, примерно в 4-5 раз большее сопротивление в клетках мезофилла» (Зитте и др., 2007).

Расчет проводимости поверхности в Кат Тьене. В данной работе расчет проводимости поверхности производился по формуле (1), выведенной из (Oltchev, 1998, eq.3) либо (Kumagai, 2004, eq.1) либо (da Rocha et al., 2004, eq.4). Уравнения, использованные Ольчевым, Кумагаи, да Рочей и формула (1) идентичны при условии, что в расчетах используются потоки явного тепла (H) и скрытого тепла (LE), скорректированные на невязку теплового баланса. Большая или меньшая невязка теплового баланса для реальных измерений существует всегда, а в измерениях пульсационным методом наблюдается систематическая недооценка $H+LE$. Поэтому остаток от радиационного баланса после вычитания потоков тепла в почву, в запас тепла от земли до высоты 50 м и на фотосинтез ($R_n - G - Est - Eph$) не равен турбулентным потокам ($H+LE$) ни на 30-минутном масштабе, ни на суточном. Этим объясняется расхождение в результатах расчетов по вышеуказанным формулам без учета невязки теплового баланса. При расчете

проводимости поверхности в данной работе использовалась поправка на невязку теплового баланса по отношению Боуэна (т.е. невязка распределялась по отношению H/LE). Проводимость рассчитывалась по формуле (1):

$$\frac{1}{g_s} = r_s = -r_{av} + \frac{r_{av}\Delta}{\gamma LE} H + \frac{\rho c_p VPD}{\gamma LE} \quad (1)$$

Вычисление аэродинамической проводимости поверхности g_{av} осуществлялось по формуле (2), которая приводится по (Liu et al., 2006, eq.3):

$$\frac{1}{g_{av}} = r_{av} = \frac{\Phi_v}{\Phi_m} \frac{u}{u_*^2} + r_b \quad (2)$$

В формуле (1) g_s – проводимость поверхности для потока влаги (мм с^{-1}), r_s – сопротивление поверхности для потока влаги (с мм^{-1}), r_{av} – аэродинамическое сопротивление поверхности для потоков энергии и газов (с мм^{-1}), Δ – скорость изменения давления насыщенного водяного пара с температурой (Па К^{-1}), рассчитывавшаяся по формуле из температуры T (в градусах Цельсия) $\Delta = \frac{2503058.4(\exp(17.27T/(T + 237.3)))}{(T + 237.3)^2}$ (Murray, 1967); H – турбулентный поток тепла в атмосферу (Вт м^{-2}), LE – поток скрытого тепла (Вт м^{-2}), $\gamma = p c_p / \varepsilon L$ – психрометрическая постоянная (Па К^{-1}), где p – атмосферное давление (Па), c_p – теплоемкость воздуха при постоянном давлении ($1006 \text{ Дж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$), $\varepsilon=0.622$, L – удельная теплота парообразования ($2420000 \text{ Дж кг}^{-1}$); ρ – плотность воздуха (кг м^{-3}), VPD – дефицит водяного пара (Па). В формуле (2) g_{av} – аэродинамическая проводимость поверхности (мм с^{-1}), u – скорость ветра на высоте измерений (м с^{-1}), динамическая скорость ветра $u_* = \sqrt{\overline{u'v'}}$, $r_b=6.266u_*^{-2/3}$ (м с^{-1}).

Безразмерные параметры Φ_v и Φ_m в правой части формулы (2) зависят от вертикальных распределений скорости ветра и температуры – иными словами, они представляют собой коррекцию на стратификацию атмосферы: Φ_v – параметр атмосферной устойчивости для температуры (=интегральная функция профиля температуры), а Φ_m – параметр атмосферной устойчивости для скорости ветра (=интегральная функция профиля импульса). Эти параметры были рассчитаны по формуле, выведенной Тхомом (Thom, 1972; по Liu et al., 2006): при неустойчивой

стратификации $\Phi v = (1 - 16(z-d)/L)^{-1/2}$ и $\Phi m = (1 - 16(z-d)/L)^{-1/4}$, а при устойчивой стратификации $\Phi v = \Phi m = 1 + 5.2(z-d)/L$. Здесь $(z-d)/L$ – безразмерный параметр устойчивости Мони́на-Обухова; z – высота измерений, для точки измерений в Кат Тьене – 50 м; d – высота слоя вытеснения, или 0.67 высоты растительности, для точки измерений в Кат Тьене – 25 м; L – масштаб Мони́на-Обухова (по Дубов, Быкова, Марунич, 1978, с. 22-24), $L = -\frac{u_*^3 c_p \rho T}{\kappa g (H + LE)}$, где $\kappa = 0.41$ – постоянная Кармана. Неустойчивой стратификации соответствует $(z-d)/L < 0$, нейтральной – $(z-d)/L = 0$, устойчивой – $(z-d)/L > 0$.

Проводимость поверхности была рассчитана для дневного времени с шагом 30 минут (Рисунок 1, а), а по 30-минутным значениям были посчитаны средние суточные значения (Рисунок 1, б).

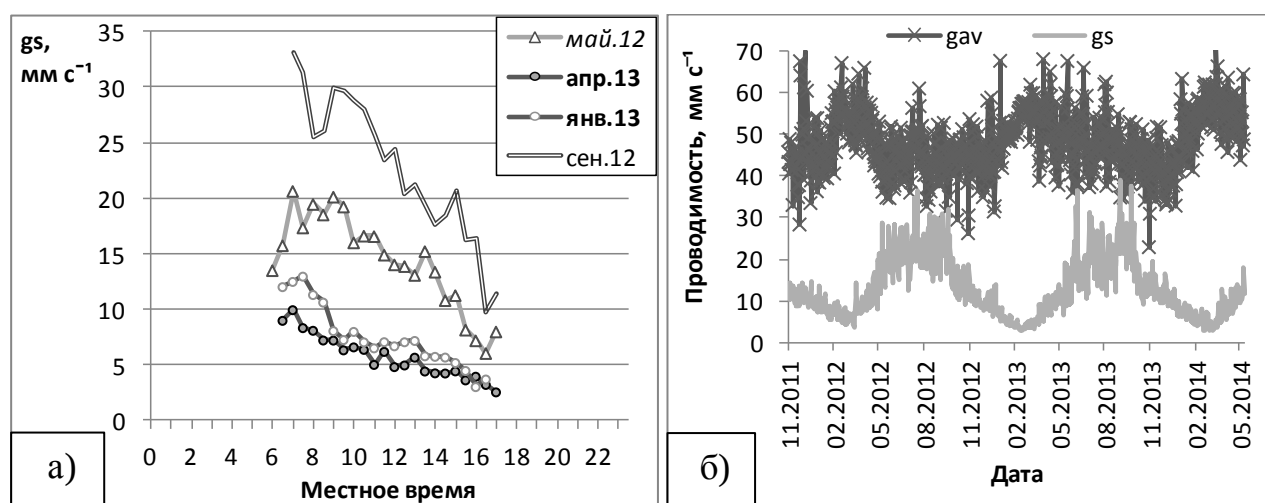


Рисунок 1 – Проводимость поверхности в суточном и сезонном ходе:

а) Суточный ход в начале влажного сезона (май 2012 г.), конце сухого сезона (апрель 2013 г.), первой половине сухого сезона (январь 2013 г.) и пике влажного сезона (сентябрь 2013 г.);

б) Сезонный ход среднесуточных значений аэродинамической проводимости (g_{av}) и проводимости поверхности (g_s)

В общем, проводимость поверхности снижается при снижении аэродинамической проводимости, росте отношения Боуэна (1-й и 2-й член формулы (1)) и засухе, при которой растет дефицит водяного пара (3-й член формулы (1)). Аэродинамическая проводимость сильно зависела от величины

потока явного тепла и повышалась во второй половине сухого сезона (Рисунок 1, б). Однако засушливые условия оказывались главным фактором, перевешивающим небольшой рост аэродинамической проводимости, вследствие чего проводимость поверхности имела ярко выраженный годовой минимум во второй половине сухого сезона (Рисунок 1, б).

В Кат Тъене в 2011-2014 гг. транспирация составляла более 80 % суммарного испарения (раздел 4.2). Поэтому проводимость поверхности более чем на 80 % обусловлена проводимостью полога леса, и рассчитанные величины можно с поправкой на сезонное изменение листового индекса приближенно интерпретировать как действие устичной регуляции.

Среднемесячные, рассчитанные по дневным, значения проводимости поверхности в феврале-марте 2013 г. и марте 2014 г. (самые засушливые месяцы) составили 4.4, 4.1, 4.4 мм с⁻¹, соответственно; в пике влажного сезона 2012 г. – 22.0-22.5 мм с⁻¹. В феврале – марте 2013 г. также максимальной была доля деревьев первого-второго подъярусов, сбросивших листья: от 1/3 до половины (Рисунок 3 раздела 2.1). Однако проводимость восстанавливалась значительно медленнее, чем доля облиственных деревьев: к середине апреля уже практически все листопадные деревья раскрыли новые листья, а высокий уровень проводимости был достигнут только к началу июня. Средняя дневная проводимость за 2012 г. составила 14.3 мм с⁻¹, за 2013 г. – 13.1 мм с⁻¹.

Выявлена значимая корреляция валовой первичной продукции и нетто-обмена углерода экосистемы с проводимостью поверхности (по среднесуточным значениям) в сухие сезоны. Во влажные сезоны корреляция была ниже уровня значимости. Это означает, что в сухой сезон более высокие значения проводимости поверхности приводили к более интенсивному поглощению углерода лесом. Валовая первичная продукция с ростом проводимости увеличивалась быстрее, чем дыхание экосистемы.

В суточном ходе проводимость поверхности снижалась от утра к вечеру (Рисунок 1, а), следуя снижающемуся отношению LE/VPD в третьем слагаемом формулы (1). Реальная проводимость должна утром быстро возрастать до

максимума, а только потом начинать снижаться (Зитте и др., 2007). Отсутствие участка резкого роста на графике обусловлено неустойчивостью расчетов по формулам (1) и (2) ранним утром и необходимостью исключать одно-два полученных утренних значения. В самое влажное время года расчетный максимум проводимости был приурочен к 7-8 ч утра и составлял в среднем 25-30 мм с⁻¹.

Итого, в суточном ходе для проводимости поверхности наибольшее значение имел 3-й член формулы (1), т.е., по сути, обеспеченность почвы и атмосферы влагой; изменения скорости ветра и аэродинамической проводимости играли меньшую роль. При высокой влагообеспеченности испарение велико, а дефицит влаги небольшой – проводимость повышается до максимальных значений. При низкой влагообеспеченности почвенная засуха лимитирует суммарное испарение, а дефицит влаги увеличивается – проводимость снижается. Зависимость проводимости поверхности от дефицита водяного пара в характерные периоды показана на графике (Рисунок 2, а).

Максимальная проводимость поверхности g_{smax} утром (при небольшом дефиците водяного пара) показывает возможность поверхности проводить влагу в данное время года, если нет ограничений по сухости воздуха. Значения g_{smax} сильно различались по сезонам – примерно в 2 раза выше в пик влажного сезона, чем в пик сухого сезона. Снижение утреннего максимума, скорее всего, обусловлено сочетанием следующих факторов: почвенной засухой, уменьшением листового индекса (LAI) и уменьшением проводимости отдельных листьев. Согласно данным Е. Новичонок для Кат Тьена (Новичонок, 2014), для видов подлеска не выявлено статистически достоверного изменения транспирации в сухой сезон, несмотря на значительное изменение влажности почвы. Однако у деревьев 2-3 подъяруса все же может снижаться транспирация. По-видимому, значительную роль для снижения суммарного испарения играет уменьшение LAI (которое, в принципе, тоже связано с снижением доступности влаги в почве).

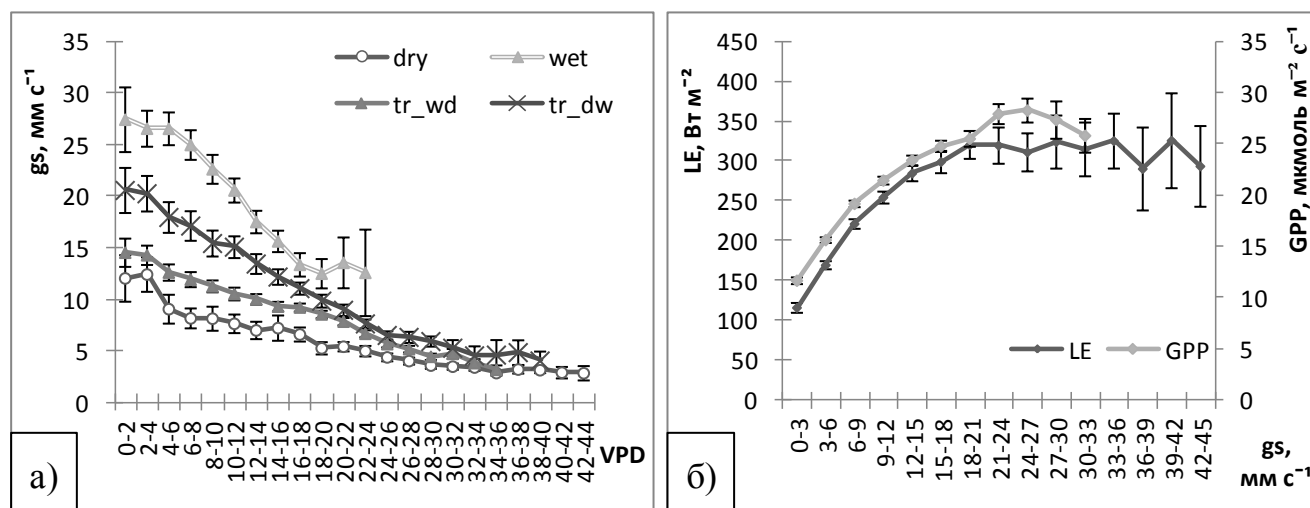


Рисунок 2 – Связь проводимости поверхности с влажностью воздуха, а также потоками влаги и углекислого газа:

а) Зависимость проводимости поверхности (g_s) от дефицита водяного пара (VPD) в характерные периоды: вторую половину сухого сезона (dry), начало влажного сезона (tr_dw), пик влажного сезона (wet) и начало сухого сезона (tr_wd);

б) Зависимость потоков суммарного испарения (LE) (левая ось на графике) и валовой первичной продукции (GPP) (правая ось на графике) от проводимости поверхности (g_s).

Полоски погрешностей показывают 95-% доверительный интервал

Во второй половине влажного сезона проводимость значительно увеличивается, что связано, по-видимому, с практически полным отсутствием лимитации проводимости по дефициту влажности воздуха. Проводимость отдельных листьев связана с их возрастом: наибольшей проводимостью обладают молодые, но уже полностью развернувшиеся листья (Руднев, 2003, с. 155). Для выяснения роли среднего возраста листьев в изменениях проводимости полагается дополнительное исследование доли молодых и старых листьев в пологе, подобное сделанному М. Кеньон (Kenyon, 2007), но охватывающему большую площадь и более долгий срок.

В два самых сухих месяца проводимость снижалась в 5 раз относительно двух самых влажных, что свидетельствует об очень сильном влиянии засухи и/или низкого листового индекса на проводимость поверхности. Тем не менее, резкое снижение проводимости (2-кратное снижение максимальной и 5-кратное снижение средней для двух самых сухих месяцев относительно двух самых

влажных) сочетается с не столь значительным сокращением потоков влаги и углерода: суммарного испарения (LE) только на 37 %, а валовой первичной продукции (GPP) – на 44 %. Аналогичные результаты были получены на станции в Синоп в Амазонии (Vourlitis et al., 2008); небольшая величина снижения потоков в Синопе объяснялась доступом корней деревьев к постоянным грунтовым водам, в то время как проводимость определялась дефицитом водяного пара. Иными словами, при значительных изменениях проводимости поверхности потоки изменялись на небольшую величину. Максимальные значения потоков достигаются при пороговой проводимости $0.18-0.21 \text{ мм с}^{-1}$, при дальнейшем повышении проводимости LE и GPP не увеличиваются.

Следствием низкой чувствительности потоков к изменениям проводимости, а также порогового эффекта является то, что суммарное испарение и валовая первичная продукция достигают 80 % от своих уровней при полностью открытых устьицах, когда расчетная проводимость поверхности составляет всего $9-12 \text{ мм с}^{-1}$. Это означает, что при снижении проводимости поверхности с 30 до 10 мм с^{-1} в течение дня в пик влажного сезона LE и GPP снижаются только на 20 %. Однако в пик сухого сезона, когда проводимость уже утром составляет всего 10 мм с^{-1} , ее дальнейшее снижение к вечеру до 4 мм с^{-1} вызывает сокращение потоков примерно на 30 %. Таким образом, во влажный сезон фотосинтез «не обращает внимания» на снижение проводимости, следуя за ходом солнечной радиации. В самые сухие месяцы же фотосинтез достигает пика чуть позже, чем проводимость, а потом начинает снижаться вслед за критическим снижением проводимости.

Среднесуточные показатели ниже $9-12 \text{ мм с}^{-1}$ фиксировались в течение 4-х месяцев, с января по апрель. Но даже при минимальной проводимости поверхности, $0-3 \text{ мм с}^{-1}$, суммарное испарение в среднем составляло 116 Вт м^{-2} (0.17 мм за час или 2.1 мм за 12 ч) а валовая первичная продукция – $11.7 \text{ мкмоль С м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Приведем сравнение средней (g_s) и утренней максимальной (g_{smax}) проводимости поверхности в Кат Тьене с другими тропическими лесами мира (Таблица 3).

Таблица 3 – Проводимость поверхности в тропических лесах

Станция	Тип леса*	Годы измерений	g_s , мм с ⁻¹ (g_{sd}/g_{sw})	g_{smax} , мм с ⁻¹ (g_{smaxd}/g_{smaxw})	Ссылка
Юго-Восточная Азия					
<i>Вьетнам</i>					
Нам Кат Тьен (Nam Cat Tien)	SE	2012-2013	13.7 (4.3/22.3)	18.3 (10/30)	Данная работа
<i>Малайзия</i>					
Ламбир (Lambir Hills)	WE	2001-2002	(9.1/16.3)		Kumagai et al., 2004
Южная Америка					
<i>Бразилия</i>					
Манаус (Manaus)	WE	1985-1988	12	22.9	Shuttleworth, 1989
Сантарем К83 (Santarem KM83)	WE	2000-2001	12.7 (12.2-13.0)	24	da Rocha et al., 2004
Казиуана (Caxiuanã)	WE	1999-2003	15.5	(27.5/22.5)	Carswell et al., 2002

*Типы тропических лесов: влажный вечнозеленый – WE, переменновлажный вечнозеленый – SE;

**Индекс _d означает сухой сезон, _w – влажный сезон; под сухим и влажным сезоном понимаются два самых сухих и два самых влажных месяца

Есть даже пример (Казиуана, Амазония), когда максимальная утренняя проводимость была выше в сухой сезон, чем во влажный, что авторы (Carswell et al., 2002) связывают с повышением температуры и количества солнечной радиации. Проводимость поверхности на станции KM83 (Сантарем, Амазония, Бразилия) за 2000-2001 гг. составила 12.7 ± 4.4 мм с⁻¹ (da Rocha et al., 2004), а в суточном ходе максимальная утренняя проводимость доходила до 24 мм с⁻¹. Да Роча с соавторами полагает, что превышение максимальной проводимости над средней примерно в 2 раза свидетельствует о сильной устьичной лимитации испарения, однако конкретный механизм остается невыясненным. Согласно (Goulden et al., 2004), снижение в суточном ходе

проводимости поверхности на КМ83 может быть обусловлено либо высоким запросом на испарение, либо влиянием высокой температуры на фотосинтез, либо внутренним циркадным (околосуточным) ритмом, либо всеми названными эффектами вместе.

Для саванны на Северной территории Австралии были получены значения в сухой сезон – 1.5 ± 0.3 , в переходный 2.5 ± 0.5 , в влажный – 9.5 ± 7.6 мм с⁻¹ (Eamus et al., 2001); для саванны в Южной Африке, на северо-востоке ЮАР, снижение проводимости поверхности ниже 6.3 мм с⁻¹ приводило к ограничению максимальных скоростей фотосинтеза на световом плато (Kutsch, 2008); в бразильском серрадо максимальная проводимость для 30-минутных значений составила 8.7, а в сухой сезон – только 2.5 мм с⁻¹ (Miranda et al., 1997). Для сравнения, максимальная проводимость поверхности лиственных и хвойных лесов умеренных широт в утренние часы составляет около 21 мм с⁻¹, а у зерновых культур – около 31-32 мм с⁻¹ (Kelliher et al., 1995).

Если суммировать, средняя проводимость поверхности в Кат Тьене близка к приведенным в литературе оценкам для влажных тропических лесов, но имеет значительно большую разницу между сухим и влажным сезоном. Проводимость поверхности лесной экосистемы в Кат Тьене в пик сухого сезона была очень низкой, сравнимой с проводимостью саванн при средней влагообеспеченности. В пик влажного сезона же проводимость в Кат Тьене превышала известные оценки для тропических и умеренных лесов и была сравнима с проводимостью агроэкосистем. Потоки влаги и углекислого газа оказались нечувствительными к большому диапазону изменений проводимости: если при полностью открытых устьицах считать потоки равными 100 %, то 80 % потоков достигались при проводимости 1/2-1/3 от максимальной. Более низкая проводимость почти не отмечалась во влажный сезон, но была характерна для полуденных часов переходных сезонов и всего дня во второй половине сухого сезона. Тем не менее, даже при минимальной проводимости поверхности суммарное испарение в среднем составляло 2.1 мм за 12 ч, а валовая первичная продукция – 11.7 мкмоль С м⁻² с⁻¹, что только в 2.5 раза меньше потоков при хорошей влагообеспеченности.

Проводимость поверхности имела очень выраженный сезонный ход и зависела от дефицита водяного пара; однако потоки влаги и углекислого газа в целом за сутки сдерживались устойчивой лимитацией только в 1-2 самых сухих месяца года.

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, а также взаимосвязей потоков радиации, влаги и углекислого газа. Поэтому некоторые повторы с предыдущими главами в разделе 5.3 оказались неизбежными для соблюдения логики изложения.

Лимитирующие факторы радиационного баланса. Радиационный баланс, единственный источник для всех статей расходов энергии в экосистеме, в Кат Тьене во влажные сезоны и в целом за 2012 и 2013 гг. превышал известные оценки для 12 из 14 тропических станций Юго-Восточной Азии и Амазонии, по которым доступны данные FLUXNET (см. раздел 3.2). Таким образом, лес Кат Тьена получает значительные энергетические ресурсы для поддержания потоков тепла, влаги и углекислого газа. Высокий радиационный баланс 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 далеко не всегда) в сочетании с вечерне-ночным пиком облачности и осадков, характерным для Южного Вьетнама. Расчеты количества облачности (индекс CSI) в Кат Тьене показывают, что полностью пасмурные дни в среднем за влажный сезон составляли только десятую часть всех дней, а преобладала переменная облачность. Большая сумма солнечной радиации в тропиках

напрямую связана с суточным ходом облачности и осадков: если увеличение облачности в основном приходится на темное время суток, то экосистема получает дополнительный ресурс солнечной радиации в связи с ослаблением облачности днем. Это выполняется в Кат Тьене: почти половина осадков в суточном ходе выпадали с 16:30 до 20:30. Вечерне-ночной пик облачности и осадков, по-видимому, является следствием значительного влияния океана на климат Кат Тьена во влажный сезон (влажный муссон приходит с океанических пространств Сиамского залива на юго-западе). 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. Таким образом, в сезон дождей в муссонном климате могут складываться более благоприятные условия по количеству солнечной радиации для природных экосистем, чем круглогодично в постоянно-влажном климате экваториальной зоны.

Отчасти также высокий радиационный баланс связан с низкой отражательной способностью (альбедо) леса Кат Тьен. За счет постоянно зеленых нижних подъярусов лес весь год использует 87-90 % падающей на него солнечной радиации, отражая в солнечном спектре только десятую часть, что соответствует нижней границе отражательной способности, характерной для тропических лесов.

Таким образом, значительный радиационный баланс в Кат Тьене за год и относительно равномерное распределение радиационного баланса по месяцам были обусловлены большой полуденной высотой солнца во влажный сезон, уменьшением среднего балла облачности в дневное время вследствие влияния океана на климат Южного Вьетнама, и низким альбедо леса. Лимитирующие факторы радиационного баланса слабо зависели от балансов влаги и углерода.

Лимитирующие факторы компонентов теплового баланса. Радиационный баланс по своей сути является лимитирующим фактором для компонентов теплового баланса. Распределение энергии в сезонном ходе между основными расходными компонентами – скрытым и явным теплом – зависело в

первую очередь от влажности почвы, которая, в свою очередь, определялась количеством осадков и их сезонным распределением.

В тех условиях, когда хватало влаги в почве, экосистема тропического леса из всех расходных компонентов теплового баланса максимизировала испарение, как происходило и в лесах Южной тайги Европейской части России (Сандлерский, 2013). Во второй половине сухого сезона, когда испарение начинало лимитироваться снижением влажности почвы, приходящая солнечная энергия «вынуждена» уходить на турбулентный нагрев атмосферы, так как экосистема не обладает возможностью запасаения энергии на более благоприятный период. Вместо совершения «полезной работы» в термодинамических терминах (Сандлерский, 2013; Puzachenko et al., 2013), т.е. работы по испарению и работы по созданию первичной продукции, энергия расходовалась на диссипацию в тепловой форме, создавая фон высокой температуры воздуха. Наличие почвенной влаги и сохранение листьев у транспирирующих в сухой сезон вечнозеленых деревьев обеспечивает относительную стабильность потока испарения (половина пришедшей энергии даже в самые засушливые месяцы тратится именно на испарение) и удерживает пришедшую солнечную энергию от рассеяния в тепловой форме, а температуру воздуха – от экстремальных значений.

На создание валовой первичной продукции, важнейшего компонента углеродного баланса, тратится совсем немного радиационной энергии – от 2 до 4 %. Доля радиации, уходящей на фотосинтез, обусловлена невысокой скоростью физиологического процесса ассимиляции CO_2 листьями и в целом низким КПД фотосинтеза природных экосистем.

Лимитирующие факторы сезонного хода и годовых сумм компонентов водного баланса. К основным компонентам водного баланса относятся осадки, суммарное испарение и сток. Осадки, приходный компонент водного баланса, являются естественным ограничителем испарения и стока. В Кат Тьене осадки обладают ярко выраженным сезонным ходом. В 2012 и 2013 г. 4/5 годовой суммы выпало во влажное полугодие; в сухие сезоны 2012-2013 и 2013-2014 гг. за 4

месяца выпало только 12-14 мм осадков, что очень мало. Годовая сумма осадков в Кат Тьене была выше, чем на 18 станциях в тропических лесах из рассмотренных 22 станций; в частности, в Кат Тьене выпадало больше осадков, чем на большей части станций Амазонии. Высокая сумма осадков в Кат Тьене обусловлена общим повышением местности на северо-восток: при набегании юго-западного муссона возвышенность дает дополнительные орографические осадки.

Лимитирующим фактором для суммарного испарения служил радиационный баланс: отмечена высокая корреляция суммарного испарения с радиационным балансом в течение всего года, а плавный сезонный ход испарения в общих чертах повторяет ход радиационного баланса. Эффект недостатка влаги начинал явно сказываться только в два последних (самых засушливых) месяца сухого сезона; об этом свидетельствовала понижавшаяся корреляция радиационного баланса с суммарным испарением. Однако в 2 наиболее сухих месяца испарение сокращалось только вдвое относительно двух месяцев с отсутствием лимитации по влаге, несмотря на то, что осадков длительное время почти не выпадало. Сохранение интенсивного испарения было обусловлено доступом корней деревьев к значительным запасам воды в грунте (постоянным грунтовым водам/запасами влаги, сохранившейся со влажного сезона).

Средняя годовая интенсивность испарения в Кат Тьене в 2012 и 2013 гг. немного превысила мультимодельную оценку в целом для территории Амазонии, хотя влажные тропические леса в срединной части Амазонии обладают более высоким испарением. Только три станции FLUXNET в тропических лесах из 22, по которым имеются данные об испарении, обладали стабильно более высоким испарением, чем лес Кат Тьена. Высокое относительно других тропических лесов мира суммарное испарение в Кат Тьене было обусловлено тремя факторами: высокой годовой суммой осадков, доступом деревьев к влаге в грунте на сухой сезон и большой суммой радиационного баланса за год и во влажный сезон.

Итого, осадки – приходный компонент водного баланса – можно считать относительно независимыми от компонентов радиационного и теплового баланса. Осадки влияли на структуру теплового баланса – распределение пришедшей

энергии между испарением и турбулентным нагревом воздуха. Суммарное испарение максимизировалось лесной экосистемой, а в сток уходила оставшаяся часть доступной влаги. Почва и материнская порода в муссонной экосистеме служит буфером, сглаживающим резкие сезонные колебания осадков. Лимитирующим фактором для суммарного испарения служил радиационный баланс, и только в самую сухую часть года (2-3 месяца) его значение снижалось, а значение распределения осадков в предыдущие месяцы возрастало.

Лимитирующие факторы сезонного хода и годовых сумм компонентов баланса углерода. К компонентам углеродного баланса относятся валовая первичная продукция (результат фотосинтеза), дыхание экосистемы (результат процессов деструкции) и нетто-обмен углерода экосистемы (разность дыхания и валовой первичной продукции).

Если ресурсов влаги достаточно для поддержания высокого уровня транспирации и охлаждения листьев, то обеспечивается широкий просвет устьичных пор и сводится к минимуму устьичная лимитация фотосинтеза. В пике влажных сезонов 2012 и 2013 гг. 83-87 % полученной энергии затрачивалось на суммарное испарение, а из этой части, по примерным оценкам, более 80 % затрачивалось на транспирацию (см. раздел 4.2); транспирация осуществлялась в максимально возможном объеме. В этих условиях в среднем 3.5-3.8 % от радиационного баланса преобразовывалось в ходе фотосинтеза в химическую энергию органических соединений. В пике влажного сезона ограничением валовой первичной продукции выступало количество полученной фотосинтетически активной радиации, а также низкий дефицит водяного пара (при увеличении дефицита продукция увеличивалась) и относительно невысокая температура.

В сухой сезон выраженным ограничением процессов продукции и деструкции служила влажность почвы. Именно она, по-видимому, являлась основным фактором для изменения листового индекса леса (*LAI*). Низкая температура в сухой сезон немного ослабляла зависимость процессов углеродного цикла от 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 фотосинтез к полудню до 70 % от утренних значений, а еще через 2-3 часа – до 50 %. В сухой сезон влажность почвы играла даже большую роль для увеличения дыхания экосистемы, чем температура, хотя известна общая закономерность экспоненциального увеличения дыхания с ростом температуры (Lloyd, Taylor, 1994).

Значительная (в сравнении с постоянно-влажными тропическими лесами) абсолютная величина валовой первичной продукции муссонного тропического леса 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 доступностью влаги для корней в грунте в сухой сезон. Дыхание экосистемы оказалось на нижней границе значений, характерных для постоянно-влажных лесов, так как в сухой сезон вследствие снижения влажности почвы дыхание сокращалось приблизительно в 1.5 раза относительно влажного сезона.

Сезонный ход нетто-обмена углерода экосистемы зависел от соотношения фотосинтеза и дыхания. Во влажный сезон валовая первичная продукция превышала дыхание, и нетто-обмен оставался отрицательным. В сухой сезон соотношение продукции/дыхания зависело от листового индекса и устьичной регуляции. Вследствие уменьшения листового индекса и засушливых условий второй половины сухого сезона валовая первичная продукция снижалась сильнее дыхания (в дыхании, помимо листьев, также участвуют почва и стволы деревьев), и нетто-обмен приближался к нулю. Вторичный пик дыхания в ноябре 2011 и 2012 гг. и нетто-обмена в 2011 г. наблюдался также в начале сухого сезона; возможно, он был связан с высыханием луж и ручьев и разложением находящейся в них органики. Динамика листового индекса может быть выражена через долю деревьев, сбрасывающих листья, и длительность безлистной фазы; эти характеристики зависят как от видовой структуры тропического леса (есть

основания полагать, что видовая структура леса Кат Тьена изменена в связи с нарушенностью – см. раздел 2.1), так и от многолетнего режима осадков территории.

Выявленный большой отрицательный нетто-обмен углерода между лесом и атмосферой (сток углерода из атмосферы в лес), по-видимому, определялся восстановлением леса после нарушений, или специфически сильным откликом на изменения климата/содержания CO_2 в воздухе (см. обсуждение в разделе 4.3). Сильный отклик углеродного баланса на изменение внешних условий гипотетически возможен благодаря относительно богатым (азотом и фосфором) почвам, вследствие чего, по-видимому, слаба лимитация ростовых процессов по питательным элементам.

В итоге, абсолютная величина нетто-обмена углерода от радиационного и водного балансов не зависела. Однако сезонный ход нетто-обмена, а также динамика фотосинтеза и дыхания экосистемы зависели от метеорологических факторов. Углеродный обмен, в первую очередь годовая величина нетто-обмена экосистемы, наименее из всех рассмотренных обменных процессов зависит от характеристик среды, наименее связан с ними, и наиболее зависит от структуры и истории развития экосистемы, что подтверждает гипотезу, высказанную в работе (Luyssaert et al., 2007) и не подтверждает вывод (Yi et al., 2010) о преимущественной зависимости нетто-обмена углерода в тропических экосистемах от режима увлажнения.

Выводы по главе. Ключевыми условиями среды, формирующими годовые величины энерго-, тепло- и влагообмена муссонного тропического леса, являлись годовое количество и синхронность сезонного хода ресурсов энергии и влаги – солнечной радиации и осадков. Эти же величины важны для динамики потока углерода из атмосферы в биоценоз – валовой первичной продукции. Дыхание экосистемы зависело скорее от сезонного хода осадков. Для абсолютной величины валовой первичной продукции и нетто-обмена углерода важен сезонный ход листового индекса, связанного с влажностью почвы и осадками. Есть основания высказать гипотезу, что большую роль для абсолютных

величин углеродного обмена в тропиках может играть обеспеченность почв минеральными элементами; количество и доступность элементов питания зависит от подстилающих пород, степени выветривания и возраста почв. Однако оценка влияния минерального питания на функционирование леса требует долгосрочных экспериментов и выходит за рамки данной работы.

Годовое количество осадков и солнечной радиации в Кат Тьене достаточно велико относительно равнинных тропических лесов мира. Одновременное увеличение осадков и солнечной энергии во влажный сезон приводит к настолько интенсивному энерго- и массообмену, что, несмотря на наличие сухого сезона, годовые показатели валовой первичной продукции и суммарного испарения в итоге приближаются к постоянно-влажным тропическим лесам.

Сезонная динамика энерго- и массообмена зависит в первую очередь от длительности сухого сезона, количества и частоты осадков в сухой сезон. В Кат Тьене сухой сезон относительно недолог (в среднем 4 месяца с суммой осадков каждого <100 мм) и смягчается периодическим проникновением воздуха с Тихого океана. Засушливость и продолжительность сухого сезона в Южном Вьетнаме значительно возрастает, когда наблюдается фаза Эль-Ниньо крупномасштабного метеорологического явления в тропиках Эль-Ниньо-Южное колебание.

Ключевыми характеристиками экосистемы муссонного тропического леса для энерго- и массообмена являлись 1) особенности листового покрова: сезонный ход листового индекса (суммарной площади листьев на единицу площади поверхности) и характеристики листопадности (процент деревьев, сбрасывающих листья, длительность безлистной фазы); 2) в отсутствие доступных в сухой сезон грунтовых вод – способность грунтов к накоплению влаги на период в несколько месяцев. Устьичная регуляция значительно снижала испарение и валовую первичную продукцию только во второй половине сухого сезона. Сезонные изменения листового покрова тропического леса зависят от видового состава; прослеживаются связи фенологии с нарушенностью леса. Деревья коренных видов и семейств, характерные для первичного ненарушенного

леса (как, например, семейство Dipterocarpaceae), быстрее выпускают листья в сухой сезон после листопада и имеют более низкое альбедо, т.е. используют большую часть поступающей солнечной энергии для формирования первичной продукции и испарения. Экотонные виды (виды лесных прогалин, обочин дорог), такие как распространенная в Кат Тьене *Lagerstroemia Calyculata* (по нашим расчетам, формирующая треть взрослых индивидуальных деревьев первого-второго яруса около точки пульсационных измерений), остаются без листьев 2-3 месяца. Различия фенологических характеристик деревьев ранних и поздних стадий сукцессии подтверждаются исследованиями 20 видов деревьев влажного тропического леса в Амазонии (Nogueira et al., 2004). Деревья ранних стадий сукцессии, многочисленные в нарушенном лесу, сбрасывают листья на большие сроки и «переживают» более длительный период неблагоприятных условий в течение года, находясь в пассивном состоянии.

Изменение энерго- и массообмена экосистемы, восстанавливающейся после нарушений. Согласно гипотезам Одума (Одум, 1986, т.2, стр.167), по мере приближения экосистемы к равновесному состоянию с окружающей средой (климаксу) увеличивается валовая первичная продукция (*GPP*), дыхание (*Resco*) и биомасса; соотношение *GPP/Resco* стремится к единице; соотношение *GPP/биомасса* снижается; круговороты элементов становятся более замкнутыми; возрастает эффективность использования ресурсов и биогенных элементов. Гипотезы кажутся достаточно очевидными, но для проверки требуют наличия и обработки огромного массива данных по различным экосистемам мира.

Если верно то, что лес Кат Тьена нарушен и восстанавливается (см. обсуждение в разделе 2.1), то многолетние измерения потоков углерода в Кат Тьене можно рассматривать как аргументы в пользу или против гипотез Одума. Пока же в пользу гипотез Одума говорит факт превышения валовой первичной продукции над дыханием экосистемы, вследствие чего лес ассимилирует в годовом цикле значительное количество углерода.

Из результатов данного исследования вытекает, что в нарушенном тропическом лесу изменяются не только углеродный цикл, но и водный.

Отличаются важнейшие характеристики энерго- и массообмена. При одном и том же количестве получаемых ресурсов суммарное испарение в сухой сезон снижается; увеличивается сезонность потоков испарения, явного тепла, валовой первичной продукции и дыхания; поверхностный сток в сухой сезон увеличивается; нетто-обмен углерода становится отрицательным, т.к. лес накапливает углерод в биомассе. Тогда энерго- и массообмен зрелого леса будет обладать менее выраженной сезонностью – т.е. можно сказать, что экосистема будет стремиться сгладить сезонные изменения количества осадков, сохраняя по возможности высокое суммарное испарение и фотосинтез.

Заключение

Интегральные оценки энерго- и массообмена (CO_2 , H_2O). Были получены оценки радиационного баланса, суммарного испарения и нетто-обмена углерода за период 11.2011-05.2014. За 2012 г. радиационный баланс леса составил $4876 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, сумма осадков 2621 мм год^{-1} , суммарное испарение, или эвапотранспирация (с принятой поправкой на невязку теплового баланса) – 1548 мм год^{-1} , валовая первичная продукция – $3436 \text{ грамм углерода на квадратный метр в год (г С м}^{-2} \text{ год}^{-1})$, дыхание экосистемы – $3035 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. За исключением двух самых жарких месяцев, лес оставался стоком углерода из атмосферы; нетто-обмен углерода (NEE) составил $-401 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (отрицательное значение означает сток углерода). За 2013 г. радиационный баланс леса составил $4841 \text{ МДж м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, сумма осадков 2634 мм год^{-1} , испарение 1476 мм год^{-1} , валовая первичная продукция – $3451 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, дыхание экосистемы – $2988 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Как и в 2012 г., лес оставался стоком углерода из атмосферы, кроме двух самых жарких месяцев; нетто-обмен углерода составил $-453 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Точность годовых оценок NEE составляет около $\pm 100 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

Полученные данные свидетельствуют, что радиационный баланс и суммарное испарение исследуемого тропического муссонного леса близки к верхним пределам среди тропических лесов планеты, по которым доступны данные FLUXNET, мировой сети наблюдений за потоками тепла, влаги и углерода. Валовая первичная продукция близка к средним оценкам, дыхание экосистемы – на нижней границе оценок по тропическим лесам мира. Сток углерода из атмосферы в муссонный тропический лес Кат Тьена больше, чем в среднем по тропическим лесам, но не является исключительным. В целом полулистопадные сложные леса Южного Вьетнама по интегральным показателям функционирования ближе к постоянно-влажным тропическим лесам, чем к сезонно-влажным листопадным, и даже могут характеризоваться более

интенсивными потоками тепла, влаги, углерода, чем постоянно-влажные леса. Между тем, в классификации тропических лесов Олсона (Olson et al., 2001) леса Южного Вьетнама отнесены к «тропическим сухим широколиственным лесам» в противоположность «тропическим влажным широколиственным лесам». Поэтому необходимо учитывать функциональный аспект в классификациях тропических лесов, в частности, учитывать сезонный ход энерго- и массообмена.

Причинами интенсивных потоков энерго- и массообмена являются, во-первых, одновременно большое количество солнечной радиации (т.е. ресурсов энергии) и большое количество осадков (ресурсов влаги) за год, а также высокий радиационный баланс во влажный сезон, одновременно с большим количеством осадков; во-вторых, доступ корней деревьев к влаге в грунте в сухой сезон (либо за счет способности грунта накапливать значительное количество влаги, либо за счет грунтовых вод); в-третьих, возможно, восстановление леса после нарушений и/или реакция на увеличение осадков в сухой сезон и содержания CO_2 в атмосфере.

Благоприятные для экосистем условия среды в тропиках напрямую связаны с суточным ходом облачности и осадков: если увеличение облачности в основном приходится на темное время суток, то экосистема получает дополнительный ресурс солнечной радиации в связи с ослаблением облачности днем. Это и характерно для Кат Тьена.

Факторы, влияющие на сезонный ход потоков влаги и CO_2 . Как и в постоянно-влажных лесах, в муссонном лесу суммарное испарение в сезонном ходе наиболее зависело от радиационного баланса (коэффициент корреляции по среднесуточным значениям изменялся от сухого к влажному сезону от $r=0.60$ до $r=0.94$)²³. Только в самые засушливые 1-2 месяца сухого сезона испарение снижалось вследствие понижения листового индекса и устьичной лимитации транспирации в условиях низкой влажности почвы. 3/4 годового радиационного

²³ Здесь и далее приведены коэффициенты корреляции по среднесуточным значениям с вычтенным сезонным трендом в скользящем окне 30 дней, уровень значимости $\alpha=0.05$, порог значимой корреляции для 3 месяцев и более (сезоны) составлял 0.2 по модулю.

баланса тратилось на испарение, что близко к оценкам для постоянно-влажных тропических лесов и обусловлено тем, что лесная экосистема максимизирует транспирацию для повышения продукции.

Валовая первичная продукция во влажный сезон увеличивалась с ростом количества солнечной радиации ($r=0.67$); также положительное влияние при достаточной влажности почвы оказывал рост температуры воздуха и дефицита водяного пара. Дыхание экосистемы во влажный сезон оставалось приблизительно постоянным, на уровне постоянно-влажных тропических лесов. В сухой сезон дыхание значительно снижалось, что было связано в первую очередь с резким снижением влажности почвы. Во влажный сезон повышение температуры почвы вызывало увеличение дыхания (известен закон экспоненциального роста дыхания с температурой), но в самых засушливых условиях дыхание экосистемы даже снижалось с повышением температуры почвы.

Суточный ход потоков влаги и углерода и проводимость поверхности в разные периоды года. Во влажный сезон, при отсутствии лимитации по влаге, потоки суммарного испарения и валовой первичной продукции в суточном ходе хорошо соответствовали ходу радиационного баланса (т.е. доступной энергии). Проводимость поверхности в Кат Тьене (условная величина, обратная сопротивлению экосистемы для потока испаряемой воды) 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 проводимостью саванн при средней влагообеспеченности. Низкая проводимость ограничивала транспирацию и еще больше – продукцию: испарение экосистемы (4/5 которого составляла транспирация) не увеличивалось в дневные часы с увеличением дефицита водяного пара, а валовая первичная продукция достигала максимума утром, а затем в течение дня с увеличением дефицита водяного пара снижалась. Тем не менее, даже в пик сухого сезона месячные суммы испарения и валовой первичной продукции оставались сравнительно высокими.

Способность экосистемы к поддержанию высоких потоков влаги и валовой первичной продукции в сухой сезон. В сухие сезоны 2012-2013 и 2013-2014 гг., когда в течение 4 месяцев сумма осадков составляла всего несколько мм мес⁻¹, испарение снизилось только на 31 % (в среднем по двум годам) по сравнению со 4-мя самыми влагообеспеченными месяцами, валовая первичная продукция – на 31 %, дыхание – на 34 %. Столь небольшое снижение потоков свидетельствует о невысоком влиянии водного стресса на интегральные показатели функционирования экосистемы в сухой сезон, что достигается постепенным расходом запасов влаги в почве и растениях. В функционировании муссонных лесов со сложной структурой, по-видимому, исключительную роль играют свойства грунтов в запасании влаги с влажного сезона, а также возможность запасания влаги в растениях.

Ключевые характеристики экосистемы муссонного тропического леса и ключевые параметры среды, определяющие энерго- и массообмен. Ключевыми характеристиками экосистемы муссонного тропического леса для энерго- и массообмена являются 1) особенности листового покрова: сезонный ход листового индекса (суммарной площади листьев на единицу площади поверхности) и характеристики листопадности (процент деревьев, сбрасывающих листья, длительность безлистной фазы); 2) гидрогеологические характеристики ландшафта, обуславливающие доступность влаги для корней деревьев в грунте в сухой сезон (грунтовые воды/способность грунта к накоплению влаги с влажного сезона). Ключевыми условиями среды для суммарного годового энерго- и массообмена (ЭМО) муссонного тропического леса являются годовое количество и синхронность хода ресурсов энергии и влаги – солнечной радиации и осадков. Ключевыми условиями среды для сезонного хода ЭМО муссонного тропического леса являются продолжительность и засушливость сухого сезона.

Связь энерго- и массообмена, характеристик листопада и нарушенности (гипотеза). Лес, в котором а) меньшая доля деревьев сбрасывает листья и б) на менее короткие сроки, – активнее вегетирует в сухой сезон и продуцирует большие потоки суммарного испарения и углекислого газа в целом

за год. Длительность безлистной фазы и ход листового индекса в тропическом муссонном лесу при одних и тех же климатических условиях напрямую связаны с видовым составом древостоя, а видовой состав, в свою очередь, – с характеристиками почв и с нарушенностью. Экотонные виды (виды лесных прогалин, быстрее растущие), преобладающие в нарушенном лесу, сбрасывают листья на более продолжительные сроки (Blanc et al., 2000; Nogueira et al., 2004). Таким образом, по мере возрастания нарушенности тропического леса снижаются потоки суммарного испарения и валовой первичной продукции в сухой сезон и в целом за год.

Прогноз изменения энерго- и массообмена леса Кат Тьен в связи с возможными сукцессиями. Если верна гипотеза об антропогенной нарушенности леса Кат Тьен, выдвинутая на основании литературных данных и данных о структуре леса (см. раздел 2.1), и в будущие десятилетия лес будет постепенно восстанавливаться (иными словами, будет снижаться доля экотонных видов), то тренды энерго- и массообмена экосистемы будут следующими:

- увеличение осадков в сухой сезон (Дещеревская и др., 2013), увеличение доли коренных пород приведет к менее выраженной листопадности и сезонности;
- увеличение биомассы и листового индекса, менее выраженная сезонность приведет к повышению суммарного испарения, валовой первичной продукции, дыхания в сухой сезон и за год;
- нетто-обмен углерода экосистемы будет оставаться отрицательным, слабо зависящим от изменений метеорологических условий разных лет, но с течением времени абсолютная величина нетто-обмена будет уменьшаться, пока лес не войдет в стационарное состояние;
- сильные явления Эль-Ниньо, сопровождающиеся продолжительной засухой, будут провоцировать повышенную опасность лесных пожаров во второй половине сухого сезона. Пожар может привести к катастрофическому необратимому изменению структуры и видового состава экосистемы.

Список использованных источников

1. Аничкин А.Е. Структура и функциональная роль животного населения почв муссонного тропического леса Вьетнама. Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук. М., 2008.
2. Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2008.
3. Братсерт У.Х. Испарение в атмосферу. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
4. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1956.
5. Веретенников А.В. Физиология растений: Учебник. //М.: Академический проект, 2006. 480 с.
6. Волков Ю.А., Кухарец В.П., Цванг ЛР. Турбулентность в пограничном слое атмосферы над степной и морской поверхностью// Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1968, т.4, №10, с. 18-28.
7. Григорьев А.А., Будыко М.И. О периодическом законе географической зональности. // Докл. АН СССР, том 110, N1, 1956. Стр. 129-132.
8. 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.: Товарищество научных изданий КМК, 2012.
9. Дещеревская (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. М.: Геофизические процессы и биосфера, 2013, Т. 12, № 2, с. 5–33.

10. Дещеревский А.В., Журавлев В.И. Анализ временных рядов с программой ABD. М.: ОИФЗ РАН, 1997. 80 с.
11. Зитте П., Вайлер Э.В., Кадерайт Й.В., Брезински А., Кёрнер К. Ботаника. Учебник для вузов: в 4 т./на основе учебника Э. Страсбургера и др.; пер. с нем. Е. Б. Поспеловой. — М.: Издательский центр «Академия», 2007. — 56 с.
12. Иванов Н.Н. Ландшафтно-климатические зоны Земного шара // Зап. ВГО, нов.сер. 1948. Вып.1. 224 с.
13. Информационные материалы. ЮНЕП/ОИК, Женева, 1997.
14. Керженцев А.С. Функциональная экология / Отв. ред. Э.Г. Коломыц. М.: Наука, 2006. 259 с.
15. Кислов А.В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001. — 351 с.
16. Климат в эпохи крупных биосферных перестроек / Гл. редакторы: М.А. Семихатов, Н.М. Чумаков. - Тр. ГИН РАН; Вып. 550. М: Наука, 2004. - 299 с.
ISBN 5-02-032917-7 Режим доступа:
http://www.sivatherium.narod.ru/library/Climate/title_pg.htm
17. Кузнецов А.Н. Тропический диптерокарповый лес. М.: ГЕОС, 2003. 140 с.
18. Кузнецов А.Н., Кузнецова С.П. Лесная растительность: видовой состав и структура древостоев. В сб. Структура и функции почвенного населения тропического муссонного леса (национальный парк Кат Тьен, Южный Вьетнам) / Под общей редакцией А.В. Тиунова. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. С. 16-43.
19. Кузнецов А.Н., Кузнецова С.П. Муссонные тропические леса Вьетнама (итоги 20-летних ботанико-экологических исследований). Известия РАН. Серия биологическая, № 2, Март-Апрель 2013. С. 206-216.
20. Кузнецов А.Н., Кузнецова С.П., Фан Лыонг. Тропические леса южного Вьетнама после комплексного военного воздействия // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отд. биол. Изд-во: Биологический факультет МГУ. 2010. Т. 115. Вып. 3. С. 32-45.

21. 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, №3, 2014. Стр. 55-82.
22. Люлькович И.Н. Лесохозяйственные климатические ресурсы. /Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации. Под ред. Кобышевой Н.В., Хайруллина К.Ш. СПб: Гидрометеиздат, 2005. – 319 с.
23. Медведев С.С. Физиология растений: учебник. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 336 с.
24. Молчанов Л.А. Новая карта испаряемости на территории Средней Азии. Метеорология и гидрология в Узбекистане. Ташкент, Изд-во АН Узб. ССР, 1955.
25. Новичонок А.О. Валовая первичная продукция и биомасса в муссонном тропическом лесу Южного Вьетнама. Дисс. на соискание уч. степени канд. биол. н. Петрозаводск, 2013.
26. Новичонок Е.В. Эколого-физиологические особенности древесных растений в биоценозе муссонного тропического леса Южного Вьетнама. Дисс. на соискание уч. степени канд. биол. н. Петрозаводск, 2014.
27. Обухов А.М. Характеристики микроструктуры ветра в приземном слое атмосферы. Изв. АН СССР, сер. геофизическая, 1951, № 3, с. 49–68.
28. Одум Ю. Экология: в 2-х т. Пер. с английского. Ред. Соколов В.Е. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
29. Пианка Э. Эволюционная экология. – М.: Мир, 1981. – Т. 399.
30. Ричардс П.У. Тропический дождевой лес. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 447 с.
31. Руднев Н.И. Средообразующая роль растительности тропических и умеренных широт Евразии. 2003. М.: ИПЭЭ РАН, 307 стр.
32. Сандлерский Р.Б. Термодинамические характеристики южно-таежных биогеоценозов на основе дистанционной информации (юг Валдайской возвышенности, Центрально-лесной заповедник) : автореф. дисс. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / Сандлерский Роберт Борисович. – М., 2013. – 37 с.

33. Селянинов Г.Т. Специализация сельскохозяйственных районов по климатическому признаку. Растениеводство СССР, 1(ч. 1), 1933. С.1-15.
34. Структура и функции почвенного населения тропического муссонного леса (национальный парк Кат Тьен, Южный Вьетнам) / Под общей редакцией А.В. Тиунова. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011.
35. Тимирязев, К.А. Избранные сочинения. Т.1. М.: Государственное изд-во сельскохозяйственной литературы, 1957. – С. 724.
36. Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. М.: Прогресс, 1980. 328 с.
37. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология: Учебник. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2001. 528 с.
38. Чиков В.И. Фотодыхание. Соросовский образовательный журнал, (11), 1996. Стр. 2-8.
39. Шашко Д.И. Агроклиматические ресурсы СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 247 с.
40. Шульгин И.А. Солнечные лучи в зеленом растении. М.: Изд-во «ПКЦ Альтекс», 2009. 216 с.
41. Adams J., Zeng N. Vegetation-Climate Interaction. – Praxis Publishing Limited, Chichester, UK, 2007.
42. Alados I., Foyo-Moreno I.Y., Alados-Arboledas L. Photosynthetically active radiation: measurements and modelling. Agricultural and Forest Meteorology, 78(1), 1996. Pp. 121-131.
43. Annual tropical cyclone report. Guam: Joint Typhoon Warning Center, 1981-2010. Режим доступа: <http://www.usno.navy.mil/JTWC/annual-tropical-cyclone-reports>
44. Araújo A.C., Nobre A.D., Kruijt B., Elbers J.A., Dallarosa R., Stefani P., von Randow C., Manzi A.O., Culf A.D., Gash J.H.C., Valentini R., Kabat P. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 107(D20), 2002. LBA-58.

45. Asdak C., Jarvis P.G., Van Gardingen P., Fraser A. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of Central Kalimantan, Indonesia. *Journal of Hydrology*, 206(3), 1998. Pp. 237-244.
46. AsiaFlux - Sustaining ecosystem and people through resilience thinking. World Meteorological Organization (ed.), WCC-3 - Climate Sense, 2009, pp.165-168, Tudor Rose, Leicester, England. Режим доступа: <http://www.asiaflux.net/AsiaFlux.pdf>
47. Aubinet M., Grelle A., Ibrom A., Rannik Ü., Moncrieff J., Foken T., Kowalski A.S., Martin P.H., Berbigier P., Bernhofer C., Clement R., Elbers J., Granier A., Grünwald T., Morgenstern K., Pilegaard K., Rebmann C., Snijders W., Valentini R., Vesala T. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. Vol. 30. 2000.
48. Aubinet M., Vesala T., Papale D. Eddy Covariance. A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. Springer Dordrecht Heidelberg, London-New York, 2012.
49. Aufdenkampe A.K., Mayorga E., Raymond P.A., Melack J.M., Doney S.C., Alin S.R., Aalto R.E., Yoo K. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(1), 2011. Pp. 53-60.
50. Baldocchi D. Assessing Eddy Covariance Technique for evaluating carbone dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global change biology*, 2003, N9. Pp.1-14.
51. Baldocchi D., Hicks B., Meyers T. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology* 69, 1988. Pp.1331-1340.
52. Beyrich F., Leps J.-P., Mauder M., Bange U., Foken T., Huneke S., Lohse H., Ludi A., Meijninger W.M.L., Mironov D., Weisensee U., Zittel P. Area-averaged surface fluxes over the LITFASS region on eddy-covariance measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, № 121, 2006. Pp. 33–65.

53. Blanc L., Maury-Lechon G., Pascal J.P. Structure, floristic composition and natural regeneration in the forests of Cat Tien National Park, Vietnam: an analysis of the successional trends. *Journal of biogeography*, 27(1), 2000. Pp. 141-157.
54. Bonal D., Bosc A., Ponton S., Goret J.Y., Burban B., Gross P., Bonnefond J.-M., Elbers J., Longdoz B., Epron D., Guehl J.-M., Granier A. Impact of severe dry season on net ecosystem exchange in the Neotropical rainforest of French Guiana. *Global Change Biology*, 14(8), 2008. Pp. 1917-1933.
55. Bonan G.B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 2008. Pp. 1444-1449.
56. Booth T.H., Nghia Nguyen Hoang, Kirschbaum M.U.F., Hackett C. and Jovanovic T. Assessing Possible Impacts of Climate Change on Species Important for Forestry in Vietnam // *Climatic Change*. Jan 1999. V. 41, N 1, P. 109-126.

Режим
доступа:

http://download.springer.com/static/pdf/826/art%253A10.1023%252FA%253A1005401200774.pdf?auth66=1351720292_a9c0057b29927163aa4e4e5d8ebe16e8&ext=.pdf
57. Borchert R. Phenology and control of flowering in tropical trees. *Biotropica*, 1983. Pp. 81-89.
58. Borchert R. Soil and stem water storage determine phenology and distribution of tropical dry forest trees. *Ecology*, 75(5), 1994. Pp. 1437-1449.
59. Brown S., Lugo A.E. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*, 1982. Pp. 161-187.
60. Bruijnzeel L.A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 104, no. 1, 2004. Pp. 185-228.
61. Bruijnzeel L.A. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review*. Amsterdam, 1990.

62. Bruno R.D., Da Rocha H.R., De Freitas H.C., Goulden M.L., Miller S.D. Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. *Hydrological Processes*, 20(12), (2006). Pp. 2477-2489.
63. Burba G. *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: A Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates*. LI-COR Biosciences, 2013.
64. Burba G.G., Anderson D.J. *A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements: Principles and Workflow Examples for Scientific and Industrial Applications*. LI-COR Biosciences, Lincoln, USA, 2010. 211 pp. Режим доступа: http://www.licor.com/env/products/eddy_covariance/ec_book.html
65. Calder I.R., Wright I.R., Murdiyarso D. A study of evaporation from tropical rain forest—West Java. *Journal of Hydrology*, 89.1, 1986. Pp. 13-31.
66. Caldwell M.M., Dawson T.E., Richards J.H. Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. *Oecologia*, 113, 1998. Pp. 151–161.
67. Cannell M.G.R., Thornley J.H.M. Modelling the components of plant respiration: some guiding principles. *Annals of Botany* 85, no. 1, 2000. Pp. 45-54.
68. Cannell M.G.R., Thornley J.H.M. Temperature and CO₂ responses of leaf and canopy photosynthesis: a clarification using the non-rectangular hyperbola model of photosynthesis. *Annals of Botany* 82, no. 6, 1998. Pp. 883-892.
69. Carswell F.E., Costa A.L., Palheta M., Malhi Y., Meir P., Costa J.D.P.R., Ruivo M. de L., Leal L. do S.M., Costa J.M.N., Clement R.J., Grace J. Seasonality in CO₂ and H₂O flux at an eastern Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 107(D20), 2002. Pp. LBA-43.
70. Cat Tien Biosphere Reserve (CTBR). *Annual report in 2010*. Dong Nai, Vietnam.
71. Chambers J.Q., Tribuzy E.S., Toledo L.C., Crispim B.F., Higuchi N., Santos J.D., Araújo A.C., Kruijt B., Nobre A.D., Trumbore S.E. Respiration from a tropical forest ecosystem: partitioning of sources and low carbon use efficiency. *Ecological Applications*, 14(sp4), 2004. Pp. 72-88.

72. Chapin III F.S., Randerson J.T., McGuire A.D., Foley J.A., Field C.B. Changing feedbacks in the climate-biosphere system. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(6), 2008. Pp. 313-320.
73. Chen Z., Yu G., Ge J., Sun X., Hirano T., Saigusa N., Wang Q., Zhu X., Zhang Y., Zhang J., Yan J., Wang H., Zhao L., Wang Y., Shi P., Zhao F. Temperature and precipitation control of the spatial variation of terrestrial ecosystem carbon exchange in the Asian region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182, 2013. Pp. 266-276.
74. Ciais P., Piao S.L., Cadule P., Friedlingstein P., Chedin A. Variability and recent trends in the African carbon balance. *Biogeosciences Discussions*, 5(4), 2008. Pp. 3497-3532.
75. Clark D.A. Sources or sinks? The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*. 2004. N 359. P. 477–491.
76. Clark D.A, Clark D.B. Assessing tropical forests climatic sensitivities with long-term data. *Biotropica*, 2011. Vol. 43, no. 1, p. 31-40 Режим доступа: <http://www.umsl.edu/divisions/artscience/biology/files/pdfs/deb-clark/2010%20Clark%20and%20Clark%20early%20online%20Biotropica%20assessing%20climatic%20sensitivities%20with%20longterm%20data%20RM.pdf>
77. Cobb K.M., Charles C.D., Cheng H., Edwards R.L. El Niño–Southern oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium // *Nature*. 2003. N 424. P. 271–276.
78. Culf A.D., Fisch G., Hodnett M.G.. The albedo of Amazonian forest and ranch land. *Journal of climate*, vol.8, p. 1544-1554, 1995.
79. Dale V.H. The role of disturbance in seasonally dry tropical forest landscapes. In: *The Ecology and Conservation of Seasonally Dry Forests in Asia*. Ed. McShea W. J., Davies S. J., Bhumpakphan N. Smithsonian Institution Scholarly Press, 2011.

80. Dawson T.E., Burgess S.S., Tu K.P., Oliveira R.S., Santiago L.S., Fisher J.B., Simonin K.A., Ambrose A.R. Nighttime transpiration in woody plants from contrasting ecosystems. *Tree Physiology*, 27(4), 2007. Pp. 561-575.
81. De la Casa A. Onset of the rainy season in the province of Cordoba (Argentina) determined by rainfall records and by evaluation of its agricultural risk condition // *Chilean journal of agricultural research*. October-December 2009. N 69(4). P. 567-576. Режим доступа: <http://www.scielo.cl/pdf/chiljar/v69n4/AT12.pdf>
82. Dou J., Zhang Y., Yu G., Zhao S., Wang X., Song, Q. A preliminary study on the heat storage fluxes of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49(2), 2006. Pp. 163-173.
83. Eamus D., Hutley L.B., O'Grady A.P. Daily and seasonal patterns of carbon and water fluxes above a north Australian savanna. *Tree Physiology*, 21(12-13), 2001. Pp. 977-988.
84. Eddy covariance: A practical guide to measurement and data analysis / Eds M. Aubinet, T. Vesala, D. Papale. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2012.
85. Falge E., Baldocchi D., Olson R., Anthoni P., Aubinet M., Bernhofer C., Burba G., Ceulemans R., Clement R., Dolman H., Granier A., Gross P., Grunwald T., Hollinger D., Jensen N.-O., Katul G., Keronen P., Kowalski A., Lai C., Law B.E., Meyers T., Moncrieff J., Moors E., Munger J.W., Pilegaard K., Rannik, Ullar, Rebmann C., Suyker A.E., Tenhunen J., Tu K., Verma S., Vesala T., Wilson K., Wofsy S. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107(1), 2001. Pp. 71-77.
86. Falge E., Baldocchi D., Tenhunen J., Aubinet M., Bakwin P., Berbigier P., Bernhofer C., Burba G., Clement R., Davis K.J., Elbers J.A., Goldstein A.H., Grelle A., Granier A., Guðmundsson J., Hollinger D., Andrew S. Kowalski, Katul G., Law B.E., Malhi Y., Tilden Meyers, Russell K. Monson, Munger J.W., Oechel W., Uv Kyaw Tha Paw, Pilegaard K., Rannik Ü, Rebmann C., Suyker A., Valentini R., Wilson K., Wofsy S. Seasonality of ecosystem

- respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, N 113, 2002. Pp. 53–74.
- 87.FAO, 1988. An interim report on the state of forest resources in the developing countries. Rome, 1988.
- 88.FAO, 1993. Forest resources assessment 1990. Tropical countries. Режим доступа: <http://www.fao.org/docrep/007/t0830e/T0830E00.htm#ТОС>
- 89.FAO, 2010. Global Forest Resources Assessment 2010. Main report. FAO forestry paper 163. Rome, 2010. Режим доступа: <http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf>
- 90.FAO, 2012. State of the World's Forests 2012. Food and agriculture organization of the united nations, Rome, 2012. Режим доступа: <http://www.fao.org/docrep/016/i3010e/i3010e00.htm>
- 91.Farquhar G. D., von Caemmerer S. V. and Berry J. A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta* 149, no. 1, 1980. Pp. 78-90.
- 92.Farquhar G. D., Von Caemmerer S. Modelling of photosynthetic response to environmental conditions. In *Physiological Plant Ecology II*. Heidelberg, Berlin: Springer, 1982. Pp. 549-587.
93. Farrera I., Harrison S.P., Prentice I.C., Ramstein G., Guiot J., Bartlein P.J., Bonnefille R., Bush M., Cramer W., von Grafenstein U., Holmgren K., Hooghiemstra H., Hope G., Jolly D., Lauritzen S.-E., Ono Y., Pinot S., Stute M., Yu G. Tropical climates at the Last Glacial Maximum: a new synthesis of terrestrial palaeoclimate data. I. Vegetation, lake-levels and geochemistry. *Climate Dynamics*, 15(11), 1999. Pp. 823-856.
- 94.Fisher R.A., Williams M., de Lourdes Ruivo M., de Costa A.L., Meir P. Evaluating climatic and soil water controls on evapotranspiration at two Amazonian rainforest sites. *agricultural and forest meteorology*, 148(6), 2008. Pp. 850-861.
- 95.Fisher J.B., Malhi Y., Bonal D., da Rocha H., de Araujo A.C., Gamo M., Goulden M., Hirano T., Huete A.R., Kondo H., Kumagai T., Loescher H.W.,

- Miller S., Nobre A., Nouvellon Y., Oberbauer S.F., Panuthai S., Rouspard O., Saleska S., Tanaka K., Tanaka N., Tu K.P. and Von Randow C. The land-atmosphere water flux in the tropics. *Global change biology*, 2009, 15, 2694–2714, doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01813.x
96. Foken T. The energy balance closure problem: An overview. *Ecological Applications*, 2008, 18(6). Pp. 1351-1367.
97. Funk J.L., Vitousek P.M. Resource-use efficiency and plant invasion in low-resource systems. *Nature*, T. 446, №. 7139, 2007. Pp. 1079-1081.
98. Göckede M., Rebmann C., Foken T. A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 127(3), 2004. Pp. 175-188.
99. Goldstein G., Andrade J.L., Meinzer F.C., Holbrook N.M., Cavelier J., Jackson P., Celis A. Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant, Cell & Environment*, 21(4), 1998. Pp. 397-406.
100. Goulden M.L., Miller S.D., Da Rocha H.R., Menton M.C., de Freitas H.C., Silva Figueira A.M., de Sousa C.A.D. Diel and seasonal patterns of tropical forest CO₂ exchange. *Ecological Applications*, 14(sp4), 2004. Pp. 42-54.
101. Goulden M.L., Munger W., Fan S.-M., Daube B.C., Wofsy S.C. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 1996, N 2, pp. 169-182.
- Режим доступа:
- http://research.eeescience.utoledo.edu/lees/papers_PDF/%5B2%5D.pdf
102. Grace J., Mitchard E., Gloor E. Perturbations in the carbon budget of the tropics. *Global Change Biology*, 2014.
103. Granados, J. Tropical forest response to climate change. Internal document of the Curso Reserva. RESERVA Program, Ducks Unlimited of Mexico, AC, 2006.

104. Granich S., Kelly M. and Nguyen Huu Ninh (eds.). Global Warming and Vietnam: A briefing document. 1993. University of East Anglia: Norwich, U.K.; International Institute for Environment and Development: London, U.K.; and Center for Environment Research Education and Development: Hanoi, Vietnam.
Режим доступа: <http://www.tiempocyberclimate.org/portal/archive/vietnam/index.htm>
105. Guardiola-Claramonte M., Troch P. A., Ziegler A. D., Giambelluca T. W., Vogler J. B. and Nullet M. A. Local hydrologic effects of introducing non-native vegetation in a tropical catchment. *Ecohydrology*, 1, 2008. Pp. 13–22. Режим доступа: http://web.hwr.arizona.edu/~surface/files/publications/2008Ecohyd_Claramonte.pdf
106. Guenther A. Seasonal and spatial variations in natural volatile organic compound emissions. *Ecological applications*, Vol. 7, Iss. 1., 1997. Pp. 34-45.
107. Hector A., Fowler D., Nussbaum R., Weilenmann M., Walsh R.P. The future of South East Asian rainforests in a changing landscape and climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366(1582), 2011. Pp. 3165-3167.
108. Helfter C., Coyle M., Phillips G., Siong J., Skiba U., Fowler D., Nemitz E. Measurements of turbulence, heat fluxes and greenhouse gas fluxes above tropical rain forest and oil palm in Sabah, Malaysian Borneo. (Poster) In: Asiaflux annual workshop, University of Hokkaido, Sapporo, Japan, 27-29 October 2009. Режим доступа: <http://nora.nerc.ac.uk/8237>
109. Huete A.R., Restrepo-Coupe N., Ratana P., Didan K., Saleska S.R., Ichii K., Panuthai S., Gamo M. Multiple site tower flux and remote sensing comparisons of tropical forest dynamics in Monsoon Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(5), 2008. Pp. 748-760.
110. International forest fire news / FAO. Dec 2000. N 23.

111. International Tropical Timber Organization (ITTO). Guidelines for the Restoration, Management and Rehabilitation of Degraded and Secondary Tropical Forests. Yokohama, Japan, 2002.
112. IPCC, 2007. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Miller H.L. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
113. IPCC, 2013. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Midgley B.M. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
114. Jackson, J.F. Seasonality of flowering and leaf-fall in a Brazilian subtropical lower montane moist forest. *Biotropica*, 1978. Pp. 38-42.
115. Kaimal J.C., Finnigan J.J. Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement. 1994
116. Keeling C.D., and Whorf T. P. Atmospheric carbon dioxide record from Mauna Loa. Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 2005.
117. Kelliher F.M., Leuning R., Raupach M.R., Schulze E.D. Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73(1), 1995. Pp. 1-16.
118. Kenyon M.A. The ecology of the golden-cheeked gibbon (*Nomascus gabriellae*) in Cat Tien National Park, Vietnam. Doctoral dissertation, PhD thesis. Anatomy School. University of Cambridge, Cambridge, 2007.
119. Kiguchi M. and Matsumoto J. The rainfall phenomena during the pre-monsoon period over the Indochina peninsula in the GAME-IOP year // *J. Meteor. Soc.* 2005. N 83. P. 89-106. Режим доступа: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/83/1/83_1_89/pdf

120. Kikuchi K., Wang B. Diurnal precipitation regimes in the tropics. *J. Climate*, vol.21, 2008, pp. 2680-2696. Режим доступа: http://www.soest.hawaii.edu/MET/Faculty/bwang/bw/paper/Wang_2008_Acta_Met_Sinica.pdf
121. Konishi S., Tani M., Kosugi Y., Takanashi S., Sahat M.M., Nik A.R., Kaoru Niiyama K., Okuda T. Characteristics of spatial distribution of throughfall in a lowland tropical rainforest, Peninsular Malaysia. *Forest ecology and management*, 224(1), 2006. Pp. 19-25.
122. Körner C. Responses of humid tropical trees to rising CO₂. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 2009. Pp. 61-79. Режим доступа: http://izt.ciens.ucv.ve/ecologia/Archivos/ECO_POB%202009/ECOPO7_2009/Korner%202009.pdf
123. Kosugi Y., Takanashi S., Tani M., Ohkubo S., Matsuo N., Itoh M., Noguchi S., Abdul Rahim N. Effect of inter-annual climate variability on evapotranspiration and canopy CO₂ exchange of a tropical rainforest in Peninsular Malaysia. *Journal of forest research*, 17(3), 2012. Pp. 227-240.
124. Kosugi Y., Takanashi S., Tani M., Ohkubo S., Matsuo N., Itoh M., Noguchi S., Abdul Rahim N. Influence of inter-annual climate variability on evapotranspiration and canopy CO₂ exchange of a tropical rainforest in Peninsular Malaysia. *Journal of Forest Research*, 17, 2012. Pp. 227-240.
125. Kousky V.E. Diurnal Rainfall Variation in Northeast Brazil. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1980. Pp. 488–498
126. Kruijt B., Elbers J.A., Von Randow C., Araujo A.C., Oliveira P.J., Culf A., Manzi A.O., Nobre A.D., Kabat P., Moors E.J. The robustness of eddy correlation fluxes for Amazon rain forest conditions. *Ecological Applications*, 14(sp4), 2004. Pp. 101-113.
127. Kubota H., Wang B. How Much Do Tropical Cyclones Affect Seasonal and Interannual Rainfall Variability over the Western North Pacific? // *J. Climate*. 2009. N 22. P. 5495–5510. Режим доступа: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2009JCLI2646.1>

128. Kumagai T.O., Saitoh T.M., Sato Y., Morooka T., Manfroi O.J., Kuraji K., Suzuki M. Transpiration, canopy conductance and the decoupling coefficient of a lowland mixed dipterocarp forest in Sarawak, Borneo: dry spell effects. *Journal of Hydrology*, 287(1), 2004. Pp. 237-251.
129. Kumagai T., Katul, G.G., Porporato A., Saitoh T.M., Ohashi M., Ichie T., Suzuki M. Carbon and water cycling in a Bornean tropical rainforest under current and future climate scenarios. *Advances in Water Resources*, 27(12), 2004. Pp. 1135-1150. Режим доступа: <http://www.forest.kyushu-u.ac.jp/staff/kumagai/adwr0401.pdf>
130. Kume T., Tanaka N., Kuraji K., Komatsu H., Yoshifuji N., Saitoh T.M., Suzuki M., Kumagai T.O. Ten-year evapotranspiration estimates in a Bornean tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(9), 2011. Pp. 1183-1192.
131. Kutsch W.L., Hanan N., Scholes R.J., McHugh I., Kubheka W., Eckhardt H., Williams C. Response of carbon fluxes to water relations in a savanna ecosystem in South Africa. *Biogeosciences Discussions*, 5(3), 2008. Pp. 2197–2235. Режим доступа: <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/29/80/09/PDF/bgd-5-2197-2008.pdf>
132. Novichonok A., Evdokimova E., Markoskaya E., Kurbatova J. Preliminary forest plant biomass inventory in monsoon tropical forest in Cat Tien national park (South Vietnam). *Proceedings of Petrozavodsk State University*. Vol. 8 (129), part 2, 2012. Pp. 13-16.
133. Lapola D.M., Oyama M.D., Nobre C.A. Exploring the range of climate biome projections for tropical South America: the role of CO₂ fertilization and seasonality. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(3), 2009.
134. Law B.E., Falge E., Gu L.V., Baldocchi D.D., Bakwin P., Berbigier P., Davis K., Dolman A.J., Falk M., Fuentes J.D., Goldstein A., Granier A., Grelle A., Hollinger D., Janssens I.A., Jarvis P., Jensen N.O., Katul G., Mahli K., Matteucci G., Meyers T., Monson R., Munger W., Oechel W., Olson R., Pilegaard K., Paw U K.T., Thorgeirsson H., Valentini R., Verma S., Vesala T.,

- Wilson K., Wofsy, S. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1), 2002. Pp. 97-120.
135. Le Page Y., Pereira J.M.C., Trigo R., da Camara C., Oom D., Mota B.W. Global fire activity patterns (1996–2006) and climatic influence: an analysis using the World Fire Atlas // *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 2007. N 7. P. 17299–17338. Режим доступа: <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/29/65/12/PDF/acp-8-1911-2008.pdf>
136. Lee X., Massman W., Law B. *Handbook of Micrometeorology*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2004. 250 pp.
137. Lewis S.L., Lopez-Gonzalez G., Sonké B., Affum-Baffoe K., Baker T.R., Ojo L.O., Oliver L. Phillips, Jan M. Reitsma, Lee White, Comiskey J.A., Djuikouo M.N., Corneille E. N. Ewango, Ted R. Feldpausch, Alan C. Hamilton, Manuel Gloor, Hart T., Annette Hladik, Jon Lloyd, Jon C. Lovett, Jean-Remy Makana, Malhi Y., Mbago F.M., Ndangalasi H.J., Peacock J., Peh K.S.-H., Sheil D., Sunderland T., Swaine M.D., Taplin J., Taylor D., Thomas S.C., Votere R., Wöll H. Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature*, 457(7232), 2009a. Pp. 1003-1006.
138. Lewis S.L., Lloyd J., Sitch S., Mitchard E.T., Laurance W.F. Changing ecology of tropical forests: evidence and drivers. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 2009b. Pp. 529-549.
139. Liu S., Lu L., Mao D., Jia L. Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements. *Hydrology & Earth System Sciences*, 11(2), 2007. Pp. 681–705. Режим доступа: <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/30/50/51/PDF/hess-11-769-2007.pdf>
140. Lloyd C.R. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agricultural and forest meteorology*, 42(1), 1988. Pp. 63-73.
141. Lloyd J., Taylor J.A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 8, 1994. Pp. 315–323.

142. Loescher H.W., Oberbauer S.F., Gholz H.L., Clark D.B. Environmental controls on net ecosystem-level carbon exchange and productivity in a Central American tropical wet forest. *Global Change Biology*, Vol. 9, Iss. 3, 2003. Pp. 396–412.
143. Loescher H.W., Gholza H.L., Jacobs J.M., Oberbauer S.F. Energy dynamics and modeled evapotranspiration from a wet tropical forest in Costa Rica. *Journal of Hydrology*, 315, 2005. Pp. 274-294.
144. Luyssaert S., Schulze E. -Detlef, Borner A., Knohl A., Hessenmoller D., Law B.E., Ciais Ph. and Grace J. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, Vol. 455, 2008. Pp. 213-215.
145. Mahe G., Servat E., Maley J. Climatic variability in the tropics. In *Forests, water and people in the humid tropics: past, present and future hydrological research for integrated land and water management*. Eds.: Bonell M. & Bruijnzeel L.A. 2004. Cambridge University Press. Pp. 267-286.
146. Malhi Y., Baldocchi D.D., Jarvis P.G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment*. N 22, 1999. Pp. 715-740.

Режим
доступа:

http://landscape.forest.wisc.edu/courses/Landscape875fall02/Malhi_etal1999.pdf
147. Malhi Y., Grace J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology & Evolution*, 15(8), 2000. Pp. 332-337.
148. Malhi Y., Pegoraro E., Nobre A.D., Pereira M.G.P., Grace J., Culf A.D., Clement R. Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 8061, DOI:10.1029/2001JD000623, 2002.
149. Malhi Y., Baker T., Phillips O.L., Almeida S., Alvares E., Arroyo L., Chave J., Czimczik C., Di Fiore A., Higuchi N., Killeen T., Laurance S.G., Laurance W.F., Lewis S., Montoya L.M.M., Monteagudo A., Neill D., Nunes Vargas P., Panfil S.N., Patino S., Pitman N., Quesada C.A., Salomao R., Silva N., Lezama A.T., Vasquez Martinez R., Terborgh J., Vinceti B., Lloyd J. The above-ground coarse wood productivity of 104 neotropical forest plot.

- Global Change Biol., 10, 2004. Pp. 1–29. Режим доступа:
http://research.eeescience.utoledo.edu/lees/papers_PDF/Malhi_2004_GCB.pdf
150. Malhi Y., Roberts J.T., Betts R.A., Killeen T.J., Li W., Nobre C.A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, 319(5860), 2008. Pp. 169-172. Режим доступа:
<http://amazonpire.org/PDF/workshop0309/papers/Malhi08.pdf>
151. Malhi Y., Aragao L.E.O., Metcalfe D.B., Paiva R., Quesada C.A., Almeida S., Teixeira L.M. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Global Change Biology*, 15(5), 2009a. Pp. 1255-1274. Режим доступа:
<http://www.biology.ufl.edu/COURSES/pcb5356/2010Spring/Kitajima/Malhi2009.pdf>
152. Malhi Y., Saatchi S., Girardin C., Aragão L.E. The production, storage, and flow of carbon in Amazonian forests. *Amazonia and Global Change*, 2009b. Pp. 355-372. Режим доступа:
<http://www.agu.org/books/gm/v186/2008GM000779/2008GM000779.pdf>
153. Malhi Y. The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation. *Journal of Ecology*, 100, 2012. Pp. 65–75, doi: 10.1111/j.1365-2745.2011.01916.x. Режим доступа:
http://www.yadvindermalhi.org/uploads/1/8/7/6/18767612/malhi_et_al_j_ecol_2012.pdf
154. Manfroi O.J., Koichiro K., Nobuaki T., Masakazu S., Nakagawa M., Nakashizuka T., Chong L. The stemflow of trees in a Bornean lowland tropical forest. *Hydrological Processes*, 18(13), 2004. Pp. 2455-2474.
155. Manfroi O.J., Kuraji K., Suzuki M., Tanaka N., Kume T., Nakagawa M., Kumagai T., Nakashizuka T. Comparison of conventionally observed interception evaporation in a 100-m² subplot with that estimated in a 4-ha area of the same Bornean lowland tropical forest. *Journal of Hydrology*, 329(1-2), 2006. Pp. 329-349.

156. Manton M. J., Della-Marta P.M., Haylock M.R., Hennessy K.J., Nicholls N., Chambers L.E., Collins D.A., Daw G. Finet A., Gunawan D., Inape K., Isobe H., Kestin T.S., Lefale P., Levu C.H., Lwin T., Maitrepierre L., Ouprasitwong N., Page C.M., Pahalad J., Plummer N., Salinger M.J., Suppiah R., Tran V.L., Trewin B., Tibig I. and Yee D. Trend in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific:1961–1998 // Int. J. Climatol. 2001. V. 21. P. 269–284. Режим доступа: http://www.vsamp.com/resume/publications/Manton_et_al.pdf
157. Marty C., Philipona R. The clear-sky index to separate clear-sky from cloudy-sky situations in climate research. Geophysical Research Letters, Volume 27, Issue 17, pages 2649–2652, 2000
158. Massman W.J., Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. Agricultural and Forest Meteorology, 113, N 1, 2002. Pp. 121-144.
159. Maurand P. L'Indochine forestiere. Ha Noi, BEI, 1943
160. McCree K.J. A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation. Agricultural Meteorology, 3(5), 1966. Pp. 353-366.
161. McKnight T.L., Hess D. Climate zones and types: Physical geography // A landscape appreciation. Upper River, NJ: Prentice Hall, 223-6, 2000.
162. McPhaden M. El Nino and La Nina: Causes and Global Consequences. Vol. 1, The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change, pp. 353–370, edited by Dr Michael C MacCracken and Dr John S Perry. In Encyclopedia of Global Environmental Change. Editor-in-Chief Ted Munn, 2002 Или: McPhadden M. El Nino and La Nina: Causes and global consequences // Encyclopedia of Global Environmental Change / Ed. Dr Michael C. MacCracken and Dr John S. Perry. 2002. P. 353–370. <http://www.astro.ulg.ac.be/~mouchet/OCEA0033-1/ElNinoLaNina.pdf>
163. Meek D.W., Hatfield J.L., Howell T.A., Idso S.B., Reginato R.J. A generalized relationship between photosynthetically active radiation and solar

- radiation. *Agronomy journal*, 76(6), 1984. Pp. 939-945. Режим доступа: <http://online.sfsu.edu/modelds/Files/References/Meek1984Agronomy.pdf>
164. Miles L., Newton A.C., DeFries R.S., Ravilious C., May I., Blyth S., Kapos V., Gordon J.E. A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography*, 33(3), 2006. Pp. 491-505.
 165. Miller S.D., Goulden M.L., Menton M.C., da Rocha H.R., de Freitas H.C., Figueira A.M.E.S., de Sousa C.A.D. Biometric and micrometeorological measurements of tropical forest carbon balance, *Ecol. Appl.*, 14, N4, suppl. S, 2004. Pp. S114 – S126.
 166. Miller S.D., Goulden M.L., Huttyra L., Keller M.A., Saleska S.R., Wofsy S.C., Figueira M., da Rocha H.R., Camargo P. Reduced Impact Logging Minimally Impacts Tropical Rainforest Carbon and Energy Exchange. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2011. Pp. 19431-19435. Режим доступа: <http://www.pnas.org/content/108/48/19431.full.pdf+html>
 167. Millet J., Pascal J.P., Kiet L.C. Effects of disturbance over 60 years on a lowland forest in southern Vietnam // *Journal of Tropical Forest Science*, 2010. C. 237-246.
 168. Miranda A.C., Miranda H.S., Lloyd J., Grace J., Francey R.J., McIntyre J.A., Meir P., Riggan P., Lockwood R., Brass J. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. *Plant, Cell & Environment*, 20(3), 1997. Pp. 315-328. Режим доступа: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-3040.1997.d01-80.x/pdf>
 169. Monteith J.L. Evaporation and surface temperature. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 107, 1981. Pp. 1–27.
 170. Montgomery R.B. Vertical eddy flux of heat in the atmosphere. *Journal of Meteorology*, 1948, N 5. Pp. 265–274.
 171. Murphy P.G., Lugo A.E. Ecology of tropical dry forest. *Annual review of ecology and systematics*, 17, 1986. Pp. 67-88.
 172. Murray F.W. On the computation of saturation vapor pressure. *J. Appl. Meteor.* 6, 1967. Pp. 203-204.

173. Nguyen KhanVan, Nguyen T.H., Phan K.L., Nguyen T.H. Bioclimatic diagrams of Vietnam. Hanoi: Vietnam National University Publishing House, 2000. Pp. 31-34.
174. Ninh N.H., Hien H.M., Lien T.V., Tuan T.Q., Huy L.Q. Reducing the Impact of Environmental Emergencies Through Early Warning and Preparedness – The Case of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) - Vietnam Case Study. UNFIP/UNEP/NCAR/WMO/IDNDR/UNU Research Programme. Tokyo: United Nations University, 2001. Режим доступа: <http://archive.unu.edu/env/govern/ElNino/CountryReports/inside/vietnam.html>
175. NOAA (National Ocean Atmospheric Administration, США). Прогноз Эль-Ниньо. Режим доступа: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/enso_disc.html
176. Nobuhiro T., Shimizu A., Kabeya N., Tsuboyama Y., Kubota T., Abe T., Araki M., Tamai K., Chann S., Keth N. Year-round observation of evapotranspiration in an evergreen broadleaf forest in Cambodia. In Forest Environments in the Mekong River Basin. Springer Japan, 2007. Pp. 75-86.
177. Nogueira A., Martinez C.A., Ferreira L.L., Prado C.H.B.A. Photosynthesis and water use efficiency in twenty tropical tree species of differing succession status in a Brazilian reforestation. Photosynthetica, 42(3), 2004. Pp. 351-356.
178. Norby R.J., DeLucia E.H., Gielen B., Calfapietra C., Giardina C.P., King J.S., Ledford J., McCarthy H.R., Moore D.J.P., Reinhart Ceulemans R., De Angelis P., Finzi A.C., Karnosky D.F., Kubiske M.E., Lukacm M., Pregitzer K.S., Scarascia-Mugnozza G.E., Schlesinger W.H., Oren R. Forest response to elevated CO₂ is conserved across a broad range of productivity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 102(50), 2005. Pp. 18052-18056. Режим доступа: http://web.ornl.gov/info/ornlreview/v40_3_07/documents/article17web_NPP-PNAS.pdf

179. Novenko E., Olchev A., Desherevskaya O., Zuganova I. Paleoclimatic reconstructions for the south of Valdai Hills (European Russia) as paleo-analogues of possible regional vegetation changes under global warming. *Env. Research Letters*. Volume 4, Number 4, October-December 2009. Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/1748-9326/4/4/045016/fulltext>
180. Novichonok A., Evdokimova E., Markovskaya E., Kurbatova J. Preliminary forest plant biomass inventory in moonson tropical forest in Cat Tien national park (South Vietnam). *Proceedings of Petrozavodsk State University*. – Vol. 8 (129), part 2, 2012. Pp. 13-16.
181. Odum E.P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 164, 1969. Pp. 262-270.
182. Oguntinyinbo J.S. Reflection coefficient of natural vegetation, crops and urban surfaces in Nigeria. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 96, 1970. Pp. 430–441. doi: 10.1002/qj.49709640907
183. Ohsawa T., Ueda H., Hayashi T., Watanabe A. and Matsumoto J. Diurnal variation of convective activity and rainfall in tropical Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79, 2001. Pp. 333-352 Режим доступа: http://game.suiri.tsukuba.ac.jp/summarycd2003/jmsj/333_352.pdf
184. Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V., Underwood E.C., D'amico J.A., Itoua I., Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Ricketts T.H., Kura Y., Lamoreux J.F., Wettengel W.W., Hedao P., Kassem, K.R. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience* 51, 2011, N 11. Pp. 933-938
185. Oltchev A., Ibrom A., Constantin J., Falk M., Richter I., Morgenstern K., Joo Y., Kreilein H. and Gravenhorst G. Stomatal and Surface Conductance of a Spruce Forest: Model Simulation and Field Measurements. *Phys. Chem. Earth*, Vol. 23, No. 4, 1998. Pp. 453-458.

186. Osborne C.P., Sack L. Evolution of C₄ plants: a new hypothesis for an interaction of CO₂ and water relations mediated by plant hydraulics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 367, 1588, 2012. Pp. 583-600.
187. Papale D., Reichstein M., Aubinet M., Canfora E., Bernhofer C., Kutsch W., Longdoz B., Rambal S., Valentini R., Vesala T., Yakir D. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 3, 2006. Pp. 571–583. Режим доступа: www.biogeosciences.net/3/571/2006
188. Paterson S. S. The forest area of the world and its potential productivity. *Meddelande fran Goteborgs Universitets Geografiska Institution*, Goteborg No. 51, 1956. Pp. 216 + 4 maps, 10 pp. refs.
189. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davisk M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399(6735), 1999. Pp. 429-436.
190. Phan Van-Tan, Ngo-Duc Thanh, Ho Thi-Minh-Ha. Seasonal and interannual variations of surface climate elements over Vietnam // *Climate Research*. 2009. V. 40. P. 49–60.
191. Phillips O.L., Malhi Y., Higuchi N., Laurance W.F., Núñez P.V., Vásquez R.M., Laurance S.G., Ferreira L.V., Stern M., Brown S., Grace J. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science*, 282(5388), 1998. Pp. 439-442. Режим доступа: <http://eprints.whiterose.ac.uk/340/1/phillipsol10.pdf>
192. Phillips O.L., Higuchi N., Vieira S., Baker T.R., Chao K.J., Lewis S.L. Changes in Amazonian forest biomass, dynamics, and composition, 1980–2002. *Amazonia and Global Change*, 2009. Pp. 373-387. Режим доступа: <http://www.agu.org/books/gm/v186/2008GM000739/2008GM000739.pdf>

193. Pinker R.T., Thompson O.E., Eck T.F. The albedo of a tropical evergreen forest. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 106, 1980. Pp. 551–558. doi: 10.1002/qj.49710644911.
194. Pfautsch S., Resco de Dios V., Loik M., Tissue D. The function of nocturnal transpiration. In *EGU General Assembly-2014 Conference Abstracts* (Vol. 16, p. 11362).
195. Polet G. and Ling S. Protecting mammal diversity: opportunities and constraints for pragmatic conservation management in Cat Tien National Park, Vietnam // *Oryx*. April 2004. V. 38, N 2. P. 186–196. Режим доступа: http://www.rhinoresourcecenter.com/pdf_files/124/1240920350.pdf
196. Polis G.A. Why are parts of the world green? Multiple factors control productivity and the distribution of biomass. *Oikos*, 3-15, 1999.
197. Practice of flux observations in terrestrial ecosystems. Ed. Monji N. et al. CGER, Japan, 2003
198. Pury D.D., Farquhar G.D. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant, Cell & Environment*, 20(5), 1997. Pp. 537-557
199. Puzachenko Y., Sandlerksy R., Sankovski A. Methods of Evaluating Thermodynamic Properties of Landscape Cover Using Multispectral Reflected Radiation Measurements by the Landsat Satellite. *Entropy*, 15(9), 2013. Pp. 3970-3982.
200. Raich J.W. Throughfall and stem flow in mature and year-old wet tropical forest. *Tropical Ecology*, 24(2), 1983. Pp. 234-243.
201. Randow von C., Manzi A.O., Kruijt B., De Oliveira P.J., Zanchi F.B., Silva R.L., Hodnett M.G., Gash J.H.C., Elbers J.A., Waterloo M.J., Cardoso F.L., Kabat P. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, 78(1-3), 2004. Pp. 5-26.

202. Rannik Ü., Kolari P., Vesala T., Hari P. Uncertainties in measurement and modelling of net ecosystem exchange of a forest. *Agricultural and forest meteorology*, 138(1), 2006. Pp. 244-257.
203. Ravindranath N.H., Somashekhar B.S., Gadgil M. Carbon flow in Indian forests. *Climatic Change*, 35(3), 1997. Pp. 297-320.
204. Ray N., Adams J.M. A GIS-based vegetation map of the world at the last glacial maximum (25,000–15,000 BP). *Internet Archaeology*, 11(3), 2001.
205. Raymond P.A., Hartmann J., Lauerwald R., Sobek S., McDonald C., Hoover M., Butman D., Striegl R., Emilio Mayorga E., Humborg Ch., Kortelainen P., Dürr H., Meybeck M., Ciais P., Guth P. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 503(7476), 2013. Pp. 355-359.
206. Reichle D.E., O'Neill R.V., Harris W.F. Principles of energy and material exchange in ecosystems. In *Unifying concepts in ecology*. Netherlands: Springer, 1975. Pp. 27-43
207. Reichstein M., Falge E., Baldocchi D., Papale D., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Gilmanov T., Granier A., Grünwald T., Havránková K., Ilvesniemi H., Janous D., Knohl A., Laurila T., Lohila A., Loustau D., Matteucci G., Meyers T., Miglietta F., Ourcival J.-M., Pumpanen J., Rambal S., Rotenberg E., Sanz M., Tenhunen J., Seufert G., Vaccari F., Vesala T., Yakir D., Valentini R. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11, 2005. Pp. 1424–1439. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x
208. Reynolds O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A*, 1895. Pp. 123-164.
209. Richardson A.D., Hollinger D.Y. A method to estimate the additional uncertainty in gap-filled NEE resulting from long gaps in the CO₂ flux record. *Agricultural and Forest Meteorology*, 147(3), 2007. Pp. 199-208.

210. Richardson A.D., Hollinger D.Y., Burba G.G., Davis K.J., Flanagan L.B., Katul G.G., Munger J.W., Ricciuto D.M., Stoy P.C., Suyker A.E., Verma S.B., Wofsy S.C. A multi-site analysis of random error in tower-based measurements of carbon and energy fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 136(1), 2006. Pp. 1-18.
211. Rickenbach, Thomas M. Nocturnal cloud systems and the diurnal variation of clouds and rainfall in southwestern Amazonia. *Monthly Weather Review* 132, no. 5, 2004. Pp. 1201-1219
212. Roberts J.M., Gash J.H.C., Tani M. and Bruijnzeel L.A. Controls of evaporation in lowland tropical rainforest. In *Forest, Water and People in the Humid Tropics*, Bonell M., Bruijnzeel L.A. and Kirby C. (Eds.), Cambridge University Press, 2005.
213. Rocha Da H.R., Goulden, M. L., Miller, S. D., Menton, M. C., Pinto, L. D., de Freitas, H. C., & e Silva Figueira, A. M.. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. *Ecological Applications* 14.sp4, 2004. Pp. 22-32
214. Rocha Da H.R., Manzi A.O., Cabral O.M., Miller S.D., Goulden M.L., Saleska S.R., R.-Coupe N., Wofsy S.C., Borma L.S., Artaxo P., Vourlitis G., Nogueira J.S., Cardoso F.L., Nobre A.D., Kruijt B., Freitas H.C., von Randow C., Aguiar R.G., Maia J.F. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *Journal of Geophysical Research*, 114, DOI: 10.1029/2007JG000640, 2009
215. Rodrigues T.R., de Paulo S.R., Novais J.W.Z., Curado L.F.A., Nogueira J.S., de Oliveira R.G., de A. Lobo F., and Vourlitis G.L. Temporal Patterns of Energy Balance for a Brazilian Tropical Savanna under Contrasting Seasonal Conditions. *International Journal of Atmospheric Sciences*, 2013. Article ID 326010, 9 pages
216. Rowland L., Hill T.C., Stahl C., Siebicke L., Burban B., Zaragoza-Castells J., Ponton S., Bonal D., Meir P., Williams M. Evidence for

- strong seasonality in the carbon storage and carbon use efficiency of an Amazonian forest. *Global change biology*, 20(3), 2014. Pp. 979-991.
217. Saigusa N., Yamamoto S., Hirata R., Ohtani Y., Ide R., Asanuma J., Gamo M., Hirano T., Kondo H., Kosugi Y., Li S.-G. Nakai Y., Takagi K., Tani M., Wang H. Temporal and spatial variations in the seasonal patterns of CO₂ flux in boreal, temperate, and tropical forests in East Asia. *Agricultural and forest meteorology*, 2008, doi:10.1016/j.agrformet.2007.12.006.
 218. Saito T., Yokouchi Y., Kosugi Y., Tani M., Philip E., Okuda T. Methyl chloride and isoprene emissions from tropical rain forest in Southeast Asia. *Geophysical Research Letters*, 35(19), 2008. P. L19812.
 219. Sanches L., Valentini C.M.A., Júnior O.B.P., de Souza Nogueira J., Vourlitis G.L., Biudes M.S., da Silva C.J., Bambi P., de Almeida Lobo F. Seasonal and interannual litter dynamics of a tropical semideciduous forest of the southern Amazon Basin, Brazil. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005–2012), 2008. Pp. 113(G4).
 220. Seasonally Dry Tropical Forests. Ed. Dirzo R., Young H.S., Mooney H.A. Island Press/Center for Resource Economics, 2011
 221. Sheriff D.W., Margolis H.A., Kaufmann M.R., Reich P.B. Resource use efficiency. *Resource physiology of conifers*. Eds. Smith W.K. and Hickley T.M. Academic Press, San Diego, 1995. Pp. 143-178.
 222. Shukla R.P., Ramakrishnan P.S. Phenology of trees in a sub-tropical humid forest in north-eastern India. *Vegetatio*, 49(2), 1982. Pp. 103-109.
 223. Shuttleworth W.J. Evaporation from Amazonian rainforest. *Proceedings of the Royal society of London. Series B. Biological sciences* 233.1272, 1988. Pp. 321-346.
 224. Shuttleworth W.J. Observations of radiation exchange above and below Amazonian forest. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 110, 1984. Pp. 1163–1169. doi: 10.1002/qj.49711046623
 225. Shuttleworth W.J., Leuning R., Black T.A., Grace J., Jarvis P.G., Roberts J., Jones H.G. *Micrometeorology of temperate and tropical forest*. Philosophical

- Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, 324(1223), 1989. Pp. 299-334.
226. Sommer A. Attempt at an assessment of the world's tropical moist forests. *Unasylva* 112-113, 1976. Pp. 5-27.
 227. Suzuki E. Diversity in specific gravity and water content of wood among Bornean tropical rainforest trees. *Ecological Research*, 14(3), 1999. Pp. 211-224.
 228. Swinbank W.C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *Journal of Meteorology*, 1951, N 8. Pp. 135–145.
 229. Tan Z., Zhang Y., Yu G., Sha L., Tang J., Deng X., Song Q. Carbon balance of a primary tropical seasonal rain forest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 2010. Pp. 115(D4).
 230. Tanaka N., Kume T., Yoshifuji N., Tanaka K., Takizawa H., Shiraki K., Tantasirin C., Tangtham N., Suzuki M. A review of evapotranspiration estimates from tropical forests in Thailand and adjacent regions. *Agricultural and forest meteorology*, 148(5), 2008. Pp. 807-819.
 231. Tani M., Abdul Rahim N., Ohtani Y., Yasuda Y., Mohd Md S., Baharuddin K., Takanashi S., Noguchi S., Zulkifli Y., and Watanabe T. Characteristics of energy exchange and surface conductance of a tropical rain forest in Peninsular Malaysia. *Ecology of a Lowland Rain Forest in Southeast Asia*. Springer-Verlag, Tokyo, 2003. Pp. 73-88
 232. Tani M., Nik A.R., Yasuda Y., Noguchi S., Shamsuddin S.A., Sahat M.M., Takanashi S. Long-term estimation of evapotranspiration from a tropical rain forest in Peninsular Malaysia. *Water Resources Systems—Water Availability and Global Change* (Proceedings of symposium HS02a held during 1UGG2003 at Sapporo. July 2003). IAHS Publ. no. 280. 2003, 267
 233. The Impact of El Nino and La Nina on Southeast Asia: 21st-23rd February 2000, Hanoi, Vietnam: // Workshop Report. Ed. M. Kelly, S. Granich, Huu Ninh Nguyen. Hanoi: Center for Environment Research Education and Development,

2000. Режим доступа: <http://www.apn-gcr.org/resources/archive/files/0e15075eee881d2aae90fd57126520dd.pdf>
234. The master plan study on Dong Nai river and surrounding basins water resources development. Final report. Vol. 4. Appendix II. Topography and geology. Appendix III. Meteorology and Hydrology. August 1996. Nippon Koei Co., LTD., Tokyo, Japan.
235. The nomination of property for inscription of the world heritage list. Cat Tien National Park, UNESCO, Vietnam, 2007.
236. Thom A.S. Momentum, mass and heat exchange of vegetation, Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc., 98, 1972. Pp. 124–134.
237. Toda M., Nishida K., Ohte N., Tani M., Musiake K. Observations of energy fluxes and evapotranspiration over terrestrial complex land covers in the tropical monsoon environment. Journal of the Meteorological Society, 80, N 3, 2002. Pp. 465-484. Режим доступа: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/80/3/80_3_465/_pdf
238. Torok S.J., Nicholls N. A historical annual temperature data set for Australia // Aust Meteorol Mag. 1996. V. 45. P. 251-260. <http://www.climateconversation.wordshine.co.nz/downloads/aust-temperatures-torok-1996.pdf>
239. Tran Hop, Iida S., Inoue S. Species composition, diversity and structure of secondary tropical forests following selective logging in Huong Son, Ha Tinh Province, Vietnam. J. Fac. Agr., Kyushu Univ., 50(2), 2005. Pp. 551-571.
240. Twine T.E., Kustas W.P., Norman J.M., Cook D.R., Houser PRea, Meyers T.P., Prueger J.H., Starks P.J., Wesely M.L. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. Agricultural and Forest Meteorology 103, no. 3, 2000. Pp. 279-300.
241. Typhoon Committee Country report 2007: Vietnam. Vietnam Hydro meteorological Service. World Meteorological Organization, 2007. Режим доступа:

http://severe.worldweather.org/tcc/document/creport/CountryReport_VietNam_2007.pdf

242. Udo S.O., Aro T. O. Global PAR related to global solar radiation for central Nigeria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 97(1), 1999. Pp. 21-31.
243. Ueyama M., Hirata R., Mano M., Hamotani K., Harazono Y., Hirano T., Miyata A., Takagi K., Takahashi Y. Influences of various calculation options on heat, water and carbon fluxes determined by open-and closed-path eddy covariance methods. *Tellus B* 64, 19048, 2012.
244. Valentini R., Matteucci G., Dolman A.J., Schulze E.D., Rebmann C., Moors E.J., Granier A., Gross P., Jensen N.O., Pilegaard K., Lindroth A., Grelle A., Bernhofer C., Grünwald T., Aubinet M., Ceulemans R., Kowalski A.S., Vesala T., Rannik Ü., Berbigier P., Loustau D., Gumundsson J., Thorgeirsson H., Ibrom A., Morgenstern K., Clement R., Moncrieff J., Montagnani L., Minerbi S., Jarvis P.G. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 404(6780), 2000. Pp. 861-865.
245. Van Oldenborgh G. J., Philip S., and Collins M. El-Nino in a changing climate: a multi-model study// *Ocean Science Discussions*. 2005. V. 2. P. 267-298. Режим доступа: <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/29/84/41/PDF/osd-2-267-2005.pdf>
246. Vandekerkhove K., De Wulf R., Chin N.N. Dendrological composition and forest structure in Nam Bai Cat Tien National Park, Vietnam // *Silva Gandavensis*. 1993. V. 58. P. 41-83.
247. Verma S.B. Aerodynamic resistances to transfers of heat, mass and momentum // *Estimation of Areal Evapotranspiration*. IAHS Publication, 177. Eds. Black T.A., Spittlehouse D.L., Novak M.D., Price D.T. IAHS Press, Wallingford, UK, 1989. Pp. 13-20.
248. Verma, S.B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy, *Remote Sensing Reviews* N 5(1), 1990. Pp. 99-115
249. Vourlitis G.L., de Souza Nogueira J., de Almeida Lobo F., Sendall K.M., de Paulo S.R., Antunes Dias C.A., Pinto Jr. O.B., de Andrade N.L.R. Energy

- balance and canopy conductance of a tropical semi-deciduous forest of the southern Amazon Basin. *Water resources research*, 44(3), 2008. P. W03412.
250. Wang B. Thrusts and prospects on understanding and predicting Asian monsoon climate, *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, N 22. Pp. 383-403. Режим доступа:
http://www.soest.hawaii.edu/MET/Faculty/bwang/bw/paper/Wang_2008_Acta_Met_Sinica.pdf
251. Wang B., Lin Ho. Rainy Season of the Asian–Pacific Summer Monsoon // *J. Climate*. 2002. V. 15. P. 386–398. Режим доступа:
<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%282002%29015%3C0386%3ARSOTAP%3E2.0.CO%3B2>
252. Wang B., Wu R., Fu X. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? // *J. Climate*. 2000. V. 13. P. 1517–1536. Режим доступа:
<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%282000%29013%3C1517%3APEATHD%3E2.0.CO%3B2>
253. Wang, B., Lin Ho, Yongsheng Zhang, and M.-M. Lu. Definition of South China Sea Monsoon Onset and Commencement of the East Asia Summer Monsoon. // *J. Climate*. 2004. V. 17. P. 699–710. Режим доступа:
<http://www.soest.hawaii.edu/MET/Faculty/bwang/bw/paper/wang116.pdf>
254. Whitford-Stark J.L. A Survey of Cenozoic volcanism on mainland Asia // *Geological Society of America Special Paper*. 1987. V. 213. P. 74.
255. Wilson K., Goldstein A., Falge E., Aubinet M., Baldocchi D., Berbigier P., Bernhofer C., Ceulemans R., Dolman H., Field C., Grelle A., Ibrom A., Law B.E., Kowalski A., Meyers T., Moncrieff J., Monson R., Oechel W., Tenhunen J., Valentini R., Verma S. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, N1, 2002. Pp. 223-243.
256. Wohl E., Barros A., Brunsell N., Chappell N.A., Coe M., Giambelluca T., Goldsmith S., Harmon R., Hendrickx J.M.H., Juvik J., McDonnell, J. & Ogden, F. The hydrology of the humid tropics. *Nature Climate Change*, 2(9), 2012. Pp. 655-662.

257. Wohlfahrt G., Widmoser P. (2013). Can an energy balance model provide additional constraints on how to close the energy imbalance?. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, 85-91. Режим доступа: http://www.biomet.co.at/wp/wp-content/uploads/2013/02/paper_2013_wohlfahrt.pdf
258. Wood T.E., Cavaleri M.A., Reed S.C. Tropical forest carbon balance in a warmer world: a critical review spanning microbial-to ecosystem-scale processes. *Biological Reviews*, 87(4), 2012. Pp. 912-927.
259. Wright S.J. The carbon sink in intact tropical forests. *Global change biology*, 19, 2013. Pp. 337-339. Режим доступа: <http://www.cfbiodiv.org/userfiles/The%20carbon%20sink%20in%20intact%20tropical%20forests.pdf>
260. WWF Indochina Programme. Transboundary Conservation in Indochina: 1995-1999 and Beyond. WWF Indochina Programme, 2001.
261. Yasunari T. Role of land-atmosphere interaction on Asian monsoon climate. *Journal of the meteorological society of Japan*, 85B, 2007. Pp. 55-75.
262. Yi C., Ricciuto D., Li R., Wolbeck J., Xu X., Nilsson M., ... (более 100 соавторов), Goldstein A. Climate control of terrestrial carbon exchange across biomes and continents. *Environmental Research Letters*, 5(3), 2010. Pp. 034007.
263. Yiqi L., Zhou X. *Soil respiration and the environment*. – Burlington, San Diego, London: Academic press, 2010.
264. Yokoyama C., Takayabu N.Y. A Statistical Study on Rain Characteristics of Tropical Cyclones Using TRMM Satellite Data // *Monthly weather review*. 2008. V. 136. P. 3848-3862. Режим доступа: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2008MWR2408.1>
265. Yu G., Song X., Wang Q., Liu Y., Guan D., Yan J., Sun X., Zhang L., Wen X. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables. *New Phytologist*, 177(4), 2008. Pp. 927-937.

266. Zhang F., Ju W., Shen S., Wang S., Yu G., Han S. How recent climate change influences water use efficiency in East Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, 07/2013; DOI:10.1007/s00704-013-0949-2.
267. Zhang L., Yu G., Sun X., Wen X., Ren C., Song X., Liu Y., Guan D., Yan Y., Zhang Y. Seasonal variation of carbon exchange of typical forest ecosystems along the eastern forest transect in China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49(2), 2006. Pp. 47-62.
268. Ziegler A., Eshel G., Rees P.M., Rothfus T., Rowley D., Sunderlin D. Tracing the tropics across land and sea: Permian to present. *Lethaia*, 36(3), 2003. Pp. 227-254.

Приложение 1. Карты Кат Тьена с расположением измерительной станции (Рисунки 1-6).

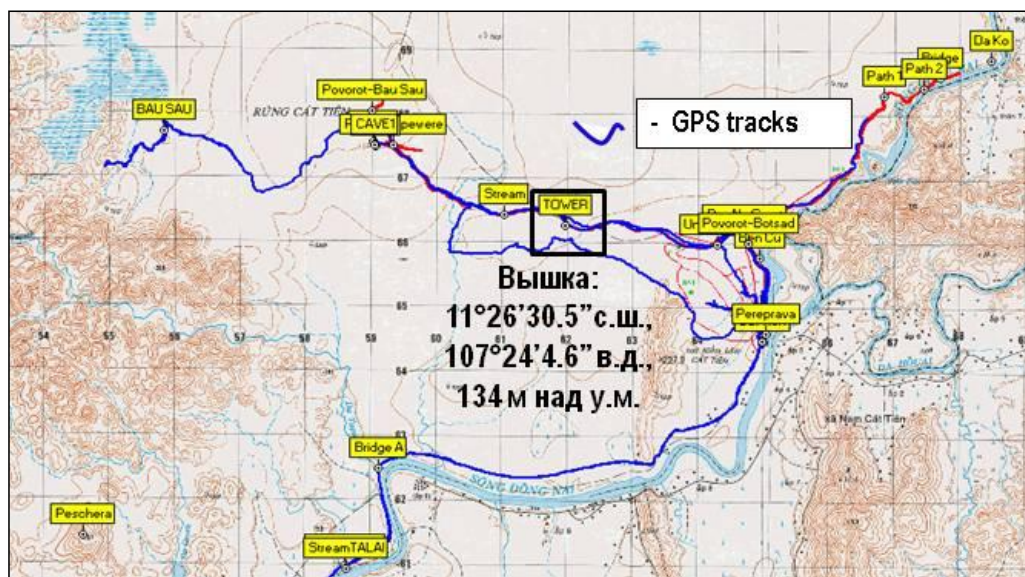


Рисунок 1 – Положение вышки пульсационных наблюдений в Кат Тиене на карте рельефа. Координаты были привязаны с помощью системы глобальной навигации GPS и обработаны в пакете OziExplorer

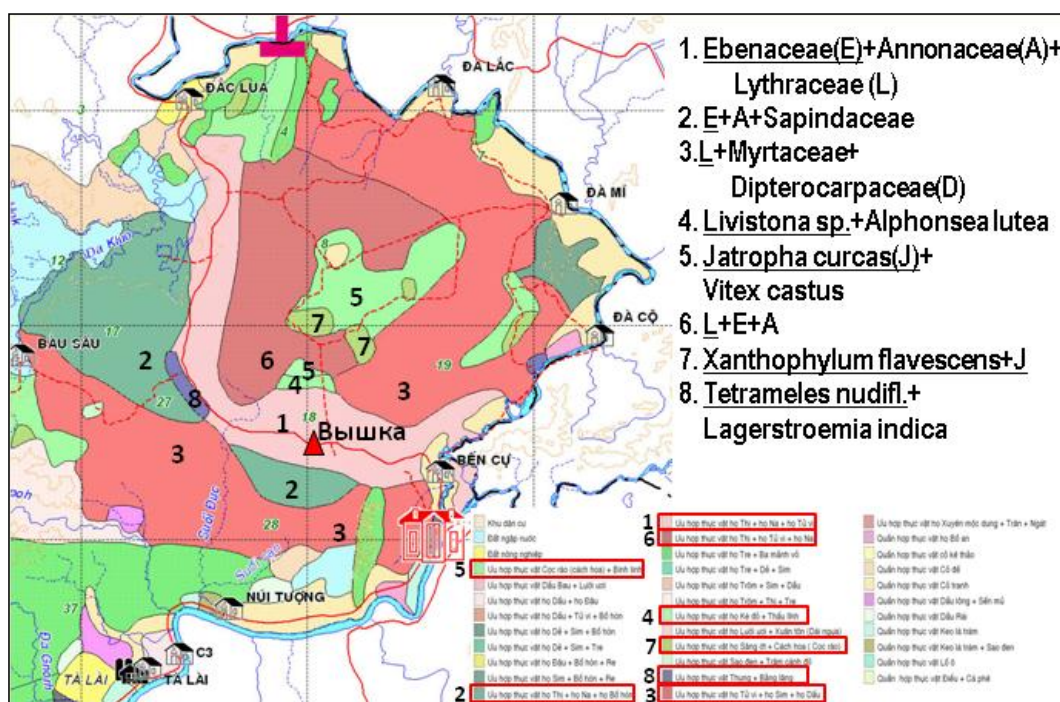


Рисунок 2 – Положение вышки пульсационных наблюдений в Кат Тиене на карте растительных сообществ 2010 года

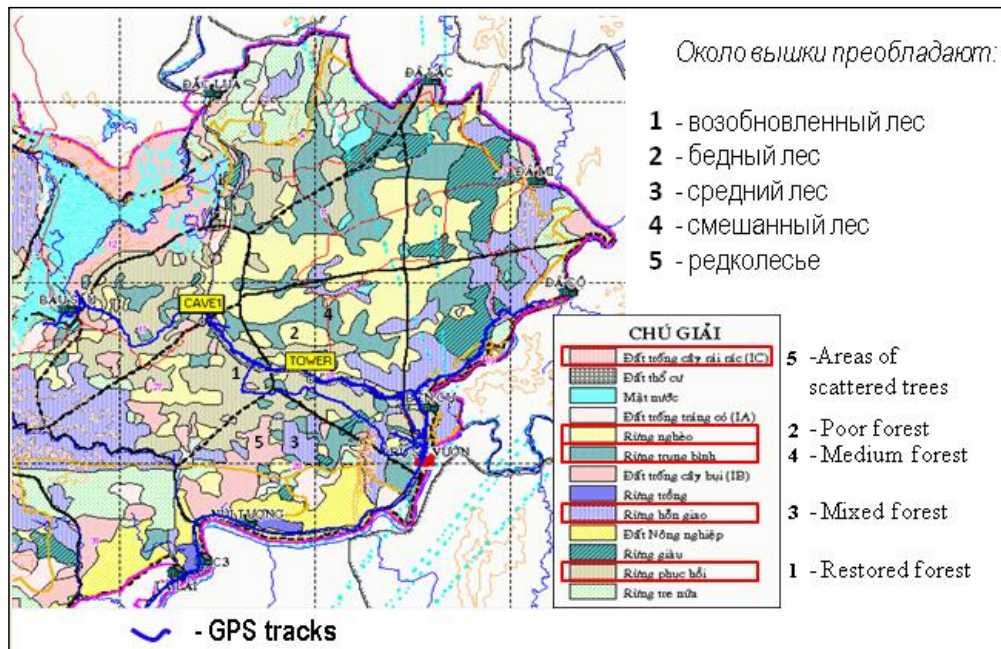


Рисунок 3 – Положение вышки пульсационных наблюдений в Кат Тиене на карте типов леса 1999 года

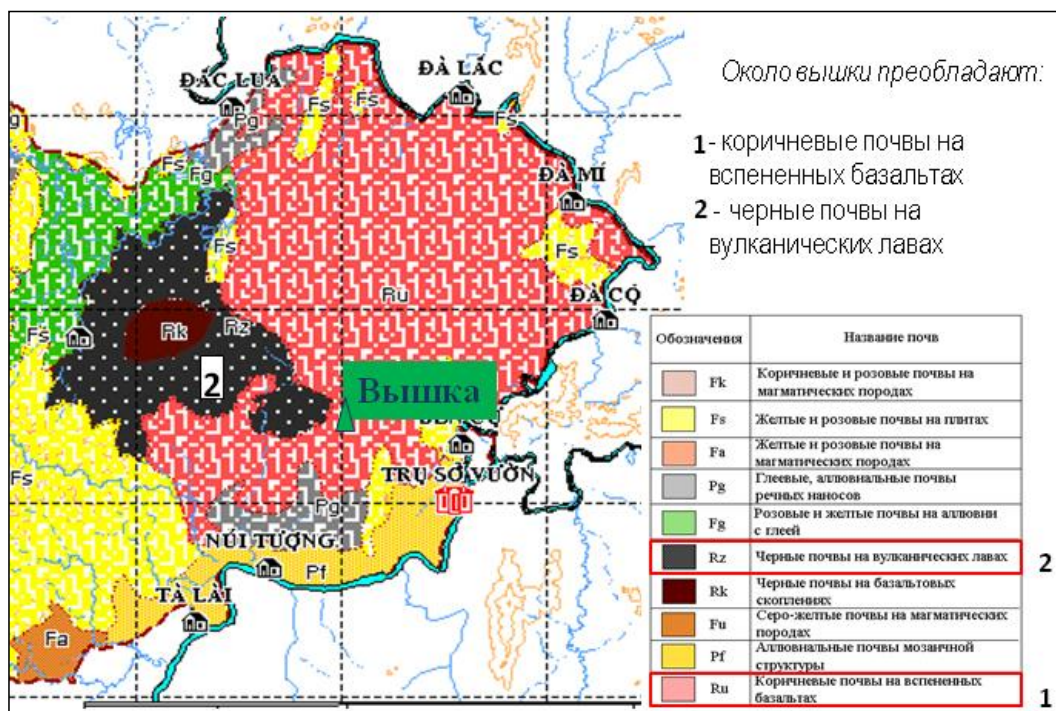


Рисунок 4 – Положение вышки пульсационных наблюдений в Кат Тиене на карте почв 2008 года



Рисунок 5 – Положение вышки пульсационных наблюдений в Кат Тиене на геологической карте 2010 года

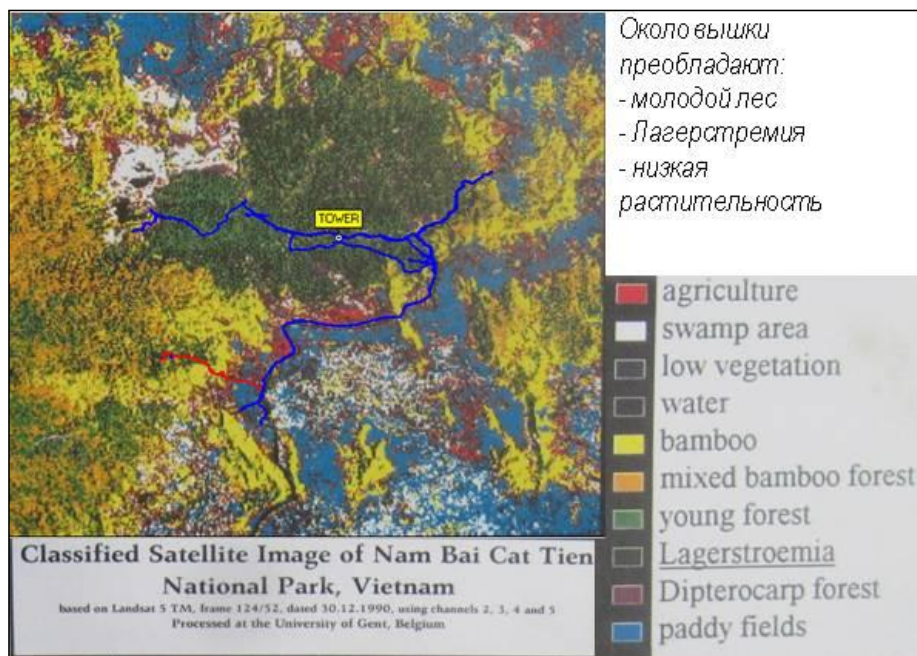


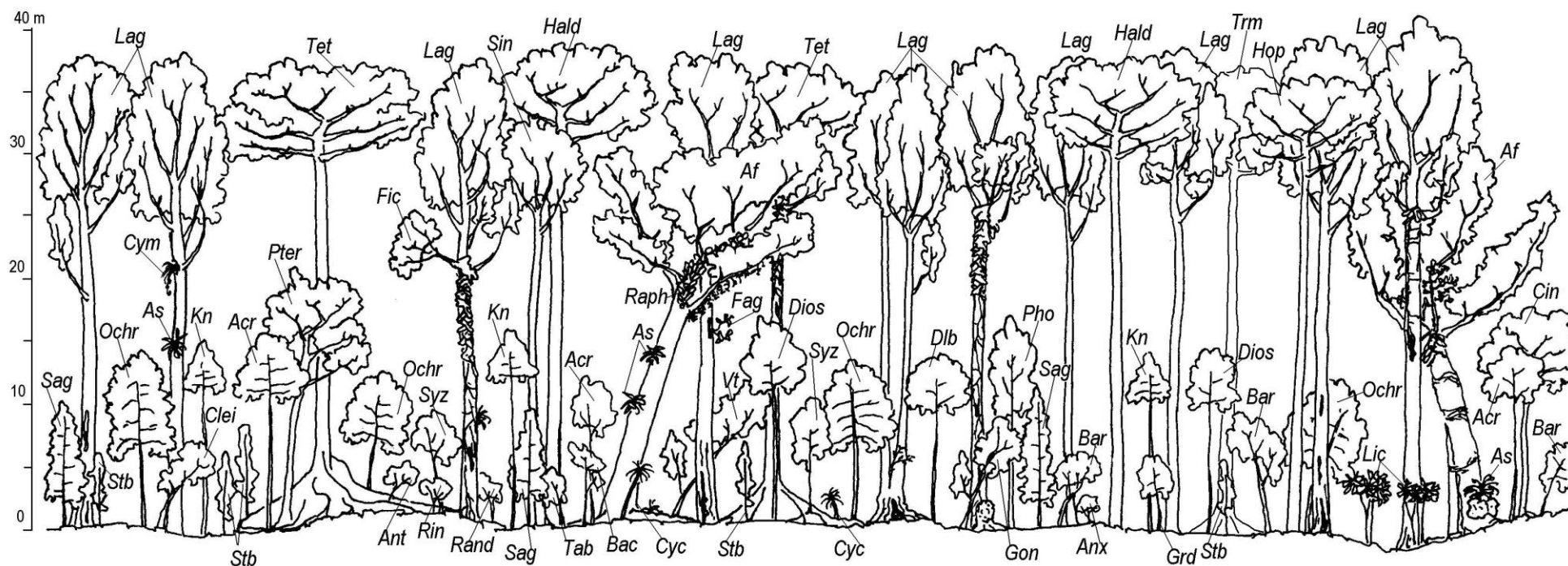
Рисунок 6 – Положение вышки пульсационных наблюдений в Кат Тиене на композитном спутниковом снимке земной поверхности за 1990 год

Приложение 2. Таксономический состав лесной растительности сектора Нам Кат Тьен (Таблица 1) и профильные диаграммы лесного древостоя (Рисунок 1, Рисунок 2) (Кузнецов, Кузнецова, 2011)

Таблица 1 (Кузнецов, Кузнецова, 2011) – Таксономический состав лесной растительности сектора Нам Кат Тьен. Жизненные формы: деревья (д), лианы (л), полуэпифиты (п/э), эпифиты (э), наземные травы (т).

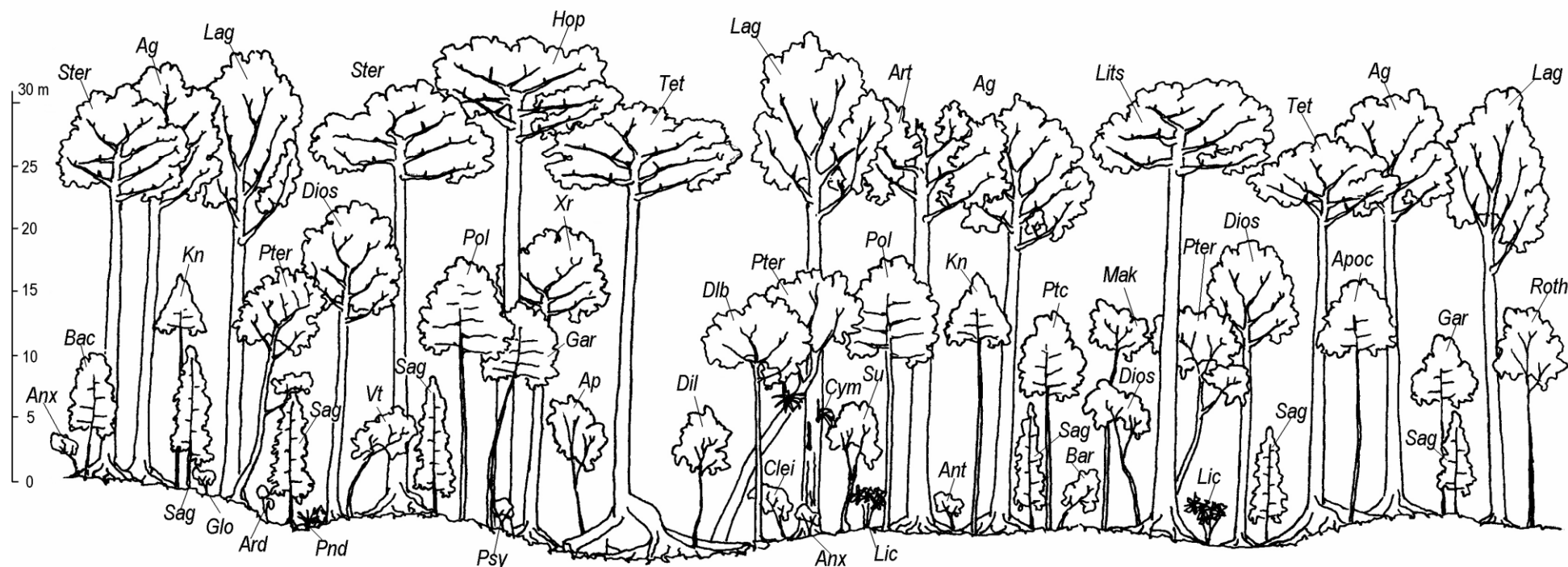
Семейство	Жизн. форма	Семейство	Жизн. Форма	Семейство	Жизн. форма
Acanthaceae	т	Dracaenaceae	т	Oleaceae	л
Adiantaceae	т	Ebenaceae	д	Ophioglossaceae	э
Anacardiaceae	д	Elaeagnaceae	л	Orchidaceae	э, т
Ancistrocladaceae	л	Elaeocarpaceae	д	Palmae	д, л
Annonaceae	д, л	Euphorbiaceae	д, т, э	Papilionaceae	д, л
Aquifoliaceae	д	Fagaceae	д	Pandanaceae	л, т
Апосунaceae	л	Flacourtiaceae	д	Passifloraceae	л
Araceae	л, э, т	Flagellariaceae	л	Pentaphragmataceae	т
Araliaceae	п/э, л	Gentianaceae	п/э	Piperaceae	л
Aristolochiaceae	т	Gesneriaceae	э	Phormiaceae	т
Asclepiadaceae	л, п/э	Gnetaceae	д, л	Polypodiaceae	э, т
Aspleniaceae	э, т	Gramineae	д, т	Proteaceae	д
Begoniaceae	т	Guttiferae	д	Psilotaceae	э
Bignoniaceae	д	Icacinaceae	д, л	Rhamnaceae	л
Blechnaceae	т	Irvingiaceae	д	Rhizophoraceae	д
Bombacaceae	д	Kiggelariaceae	д	Rosaceae	д
Burmanniaceae	т	Lamiaceae	т	Rubiaceae	д, л, э, т
Burseraceae	д	Lauraceae	д	Rutaceae	д
Caesalpiniaceae	д, л, т	Lardizabalaceae	л	Sapindaceae	д
Capparaceae	л	Lecythidaceae	д	Sapotaceae	д
Cardiopteridaceae	л	Leeaceae	т	Scrophulariaceae	т
Cecropiaceae	п/э	Lindsaeaceae	л	Selaginellaceae	т
Chrysobalanaceae	д	Lobeliaceae	т	Simaroubaceae	д
Combretaceae	д, л	Loganiaceae	л	Schizaeaceae	л, т
Commelinaceae	т	Lythraceae	д	Smilacaceae	л
Compositae	т	Malvaceae	д, т	Stemonaceae	л
Connaraceae	л	Marantaceae	т	Sterculiaceae	д
Convallariaceae	т	Marattiaceae	т	Symplocaceae	д
Convolvulaceae	л	Melastomataceae	д, т	Taccaceae	т
Costaceae	т	Meliaceae	д	Theaceae	д
Cyatheaceae	д	Menispermaceae	л	Thunbergiaceae	л
Cycadaceae	т	Mimosaceae	д, л	Tiliaceae	д, л
Cyperaceae	т	Moraceae	д, л, п/э	Ulmaceae	д
Cucurbitaceae	л	Myristicaceae	д	Urticaceae	т
Datisceae	д	Myrsinaceae	д	Verbenaceae	л
Davalliaceae	э	Myrtaceae	д	Violaceae	т
Dilleniaceae	д, л	Ochnaceae	д	Vitaceae	л
Dioscoreaceae	л	Olacaceae	л	Zingiberaceae	э, т
Dipterocarpaceae	д				

Рисунок 1 (Кузнецов, Кузнецова, 2011) – Профильная диаграмма лесного древостоя на почвах, подстилаемых базальтами. Плакорный дренированный участок, не затопливаемый во время сезона дождей



Условные обозначения: Acr - *Acronychia*, Af - *Afzelia*, Ant - *Antidesma*, Anx - *Anaxagorea*, As - *Asplenium*, Bac - *Baccaurea*, Bar - *Barringtonia*, Cin - *Cinnamomum*, Cyc - *Cycas*, Dlb - *Dalbergia*, Dios - *Diospyros*, Fag - *Fagraea*, Fic - *Ficus*, Gon - *Gonocaryum*, Hald - *Haldina*, Hop - *Hopea*, Kn - *Knema*, Lag - *Lagerstroemia*, Lic - *Licuala*, Ochr - *Ochrocarpus*, Pho - *Phoebe*, Pter - *Pterospermum*, Rand - *Randia*, Raph - *Raphidophora*, Rin - *Rinorea*, Sag - *Sageraea*, Sin - *Sindora*, Stb - *Streblus*, Syz - *Syzygium*, Tab - *Tabernaemontana*, Tet - *Tetrameles*, Vt - *Vitex*.

Рисунок 2 (Кузнецов, Кузнецова, 2011) – Профильная диаграмма лесного древостоя на почвах, подстилаемых базальтами. Плакорный дренированный участок, не затопливаемый во время сезона дождей



Условные обозначения: Ag – *Aglaia*, Ant – *Antidesma*, Anx – *Anaxagorea*, Ap – *Aporosa*, Ard – *Ardisia*, Bac – *Baccaurea*, Bar – *Barringtonia*, Clei – *Cleistanthus*, Cym – *Cymbidium*, Dios – *Diospyros*, Dlb – *Dalbergia*, Gar – *Garcinia*, Glo – *Glochidion*, Hop – *Hopea*, Kn – *Knema*, Lag – *Lagerstroemia*, Lic – *Licuala*, Mak – *Makhamia*, Pnd – *Pandanus*, Pol – *Polyalthia*, Ptc – *Pterocymbium*, Pter – *Pterospermum*, Psy – *Psychotria*, Rot – *Rothmannia*, Sag – *Sageraea*, Ster – *Sterculia*, Su – *Suregada*, Tet – *Tetrameles*, Vt – *Vitex*, Xr – *Xerocarpus*.