

На правах рукописи



ОЛЬЧЕВ АЛЕКСАНДР ВАЛЕНТИНОВИЧ

**ПОТОКИ CO₂ И H₂O В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ
В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА
(ОЦЕНКА С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ)**

03.02.08 – Экология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора биологических наук

Москва – 2015

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

Официальные оппоненты:

Чумаченко Сергей Иванович, доктор биологических наук, заведующий кафедрой информационных технологий в лесном секторе факультета лесного хозяйства ФГБОУ ВПО "Московский государственный университет леса" (МГУЛ),

Гусев Евгений Михайлович, доктор биологических наук, заведующий лабораторией физики почвенных вод ФГБУН Института водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН),

Голубева Елена Ильинична, доктор биологических наук, профессор кафедры рационального природопользования географического факультета ФГБОУ ВПО "Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова" (МГУ).

Ведущая организация:

ФГБУН Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук (ЦЭПЛ РАН)

Защита состоится 13 октября 2015 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 002.213.01 при ФГБУН Институте проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН по адресу: 119071, Москва, Ленинский проспект, д. 33.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Отделения биологических наук РАН по адресу 119071, Москва, Ленинский проспект, д. 33, и на сайте ИПЭЭ РАН по адресу www.sevin.ru. Автореферат диссертации размещен на сайте ВАК Минобрнауки РФ по адресу www.vak2.ed.gov.ru

Автореферат разослан 11 сентября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.б.н.



Елена Александровна Кацман

Актуальность исследования

Климат и лесная растительность постоянно находятся в тесном взаимодействии, формируемом через сложную систему прямых и обратных связей. Климатические условия влияют на рост и развитие лесов, а леса, в свою очередь, оказывают воздействие на климатическую систему. Процессы обезлесения и облесения, изменения видового состава лесной растительности влияют на процессы обмена и содержания парниковых газов, и прежде всего, H_2O и CO_2 в атмосфере, а также на радиационный, тепловой и водный режим земной поверхности (Григорьев, Будыко, 1956; Молчанов, 1961, 1973; Будыко, 1971, 1974; Раунер, 1972; Росс, 1975; Алексеев, 1975; Выгодская, 1981; Schimel, 1995; Grace, 2000; Семенов 2004; Шульгин, 2009; IPCC 2013; и др.).

В условиях нестабильности современного климата и усилившейся антропогенной нагрузки на растительность, актуальными являются две связанные между собой основные задачи: 1) оценка влияния изменения структуры и видового состава растительности на потоки основных парниковых газов между земной поверхностью и атмосферой, и 2) определение возможных последствий воздействия изменяющихся климатических условий на экосистемные функции лесов в разных регионах мира. При этом потоки H_2O и CO_2 служат надежными индикаторами состояния и развития лесных экосистем.

Задачи количественной оценки потоков H_2O и CO_2 в рамках изучения процессов взаимодействия лесной растительности и климата требуют развития как экспериментальных, так и теоретических (модельных) методов исследований. Модельные подходы являются главным инструментом при выполнении задач, которые не могут быть решены с применением только экспериментальных методов. В том числе, модели незаменимы: для описания процессов тепло-, H_2O - и CO_2 -обмена на территориях, не охваченных сетью мониторинговых наблюдений, с мозаичной структурой растительного покрова (РП) и сложным рельефом; для восстановления непрерывных рядов наблюдений в периоды, для которых данные измерений отсутствуют или потоки определены с погрешностями в силу методических ограничений. Кроме того, только с помощью

моделей можно провести реконструкцию динамики потоков H_2O и CO_2 в прошлые эпохи, а также спрогнозировать не только возможный отклик природных экосистем на внешние воздействия, но также и их влияние на климатическую систему в будущем.

Очевидно, что достоверность и реалистичность прогнозных и ретроспективных оценок будет тем выше, чем более адекватными природным процессам и явлениям будут модельные построения и их входные параметры.

На протяжении нескольких прошедших десятилетий для описания H_2O - и CO_2 -обмена в системе "почва - растительность - атмосфера" (ПРА) было разработано множество модельных подходов различного уровня сложности (Monteith, 1965; Менжулин, 1970; Росс, 1975; Jarvis, 1976; Тооминг, 1977; Бихеле с соавт., 1980; Ball et al., 1980; Farquhar et al., 1980; Сиротенко, 1981; Sellers et al., 1986; Choudhury, Monteith, 1988; Collatz et al., 1991, 1992; Полуэктов, Василенко, 1992; Leuning, 1995; Sharkey et al., 2007; Гусев, Насонова, 2010; и др.). Однако, до настоящего времени сохраняется частично или полностью нерешенным целый спектр задач, связанных с адекватным описанием процессов тепло-, H_2O - и CO_2 -обмена в смешанных древостоях со сложной вертикальной структурой, внутри и на границе лесов с мозаично-ярусной организацией древостоя в локальном и региональном масштабах. Понятно, что без развития модельных построений и их адаптации к реальным природным сообществам невозможно адекватно описать пространственно-временную изменчивость потоков внутри древостоев, а также оценить вклад лесных экосистем в баланс парниковых газов в атмосфере.

Основные цели и задачи исследования

В рамках решения комплексной задачи количественного описания процессов взаимодействия климата и лесной растительности **основными целями** данного исследования **являлись: разработка и развитие комплекса математических моделей локального и регионального масштаба; их применение, в совокупности с данными экспериментальных наблюдений, в качестве инструмента для определения ответной реакции составляющих**

Н₂О- и СО₂-обмена лесных экосистем тропических и умеренных широт на изменения условий внешней среды; а также для прогноза возможных изменений потоков Н₂О и СО₂ в будущем при разных климатических сценариях и при изменении структуры растительности и землепользования.

Для достижения основных целей исследования в работе решались следующие задачи:

1. Разработка комплекса процесс-ориентированных одномерных и трехмерных моделей для описания процессов тепло-, Н₂О- и СО₂-обмена в различных типах лесных экосистем в локальном и региональном масштабах, определение входных параметров и проверка их адекватности на основе экспериментальных полевых наблюдений в еловых и смешанных лесах Центральной Европы и Европейской территории России (ЕТР), а также в вечнозеленых влажных тропических лесах Индонезии.
2. Определение масштабов временной изменчивости и реакции составляющих тепло-, Н₂О- и СО₂-обмена лесных экосистем умеренных и тропических широт на изменения условий внешней среды по данным экспериментальных наблюдений и результатам модельных расчетов в условиях современного климата.
3. Прогноз возможных изменений составляющих тепло-, Н₂О- и СО₂-обмена в локальном и региональном масштабах при сплошных рубках в еловых лесах умеренных широт и обезлесении в зоне влажных тропических лесов на основе данных полевых измерений и модельных расчетов.
4. Реконструкция составляющих тепло-, Н₂О- и СО₂-обмена лесных экосистем центральных районов ЕТР в позднеледниковье и голоцене по результатам модельных расчетов с применением палеоботанических и палеоклиматических данных.
5. Определение влияния будущих изменений климатических условий на составляющие тепло-, Н₂О- и СО₂-обмена в лесных экосистемах умеренных и тропических широт по данным модельных расчетов.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются лесные экосистемы и их взаимодействие с климатической системой.

Предметом исследования являются потоки тепла, H_2O и CO_2 в лесных экосистемах, оцененные с помощью математических моделей.

Исследуемые природные объекты

В качестве основных природных объектов для изучения процессов взаимодействия лесной растительности и климата в исследовании были выбраны вечнозеленые влажные тропические леса национального парка Лоре Линду, расположенного в центральных районах о. Сулавеси в Индонезии, а также еловые и смешанные леса, произрастающие в Центральной Европе в Золлинговском национальном парке в центральной Германии и на ЕТР в верховьях Волги вблизи п. Пено, соответственно.

Основным критерием при выборе лесных экосистем было обеспечение контрастных природных условий, явлений и объектов, на примере которых, можно было проверить адекватность предложенных моделей в широком диапазоне климатических условий, и проанализировать отклик H_2O - и CO_2 -обмена лесных экосистем на изменения условий внешней среды как при современных климатических условиях, так и в будущем. Выбранные основные объекты исследований расположены на значительном удалении от крупных промышленных источников загрязнения, что позволило исключить из анализа прямое влияние антропогенных факторов на исследуемые процессы. При выборе объектов исследования учитывалась также и определяющая роль лесов умеренных и тропических широт в формировании глобального баланса CO_2 и других парниковых газов в атмосфере, а также их влияние на климатические и погодные условия в региональном и глобальном масштабе (Malhi, Grace, 2000; Liski et al., 2003; Malhi, 2010; Le Quere, 2010; FAO, 2010).

Важным критерием при выборе объектов была также и степень исследованности процессов H_2O - и CO_2 -обмена лесных экосистем в различных географических регионах. Так, несмотря на значительные площади, занимаемые

влажными тропическими лесами, процессы H_2O - и CO_2 -обмена в них исследованы пока довольно слабо. До недавнего времени основное внимание при их изучении было сосредоточено на влажных тропических лесах Центральной и Южной Америки (Phillips et al., 1998; Lloyd et al., 2007). Интенсивно развивающаяся в последнее время сеть наблюдений в экваториальных районах Африки и Юго-Восточной Азии пока не охватывает весь спектр растительных сообществ и, в частности, влажные тропические леса, произрастающие в условиях среднегорья в экваториальном климате.

Основные защищаемые положения

1. Разработанный комплекс процесс-ориентированных моделей позволяет адекватно описать процессы тепло-, H_2O - и CO_2 -обмена в лесных экосистемах в широком диапазоне изменчивости условий внешней среды на локальном и региональном уровне.
2. Несмотря на существенные различия в климатических условиях, видовом составе и разнообразии исследованных влажных тропических лесов и еловых лесов умеренных широт, величина отношения годовых сумм эвапотранспирации (E) к испаряемости (E_p) для обоих типов лесных экосистем почти одинакова. Также экосистемы характеризуются близкими значениями вклада транспирации (E_T) в суммарную величину E за год, а также относительными затратами тепла на испарение в интегральном годовом радиационном балансе (Rn).
3. Вопреки принятой точке зрения о линейном характере зависимости месячных и суточных значений валовой первичной продукции (GPP) лесов от величины поглощенной РП фотосинтетически активной радиации (ΦAP) эта зависимость для влажных тропических лесов характеризуется четко выраженной нелинейностью. В свою очередь, зависимость месячных и суточных значений нетто первичной продукции (NPP) влажного тропического леса, а также GPP и NPP еловых лесов умеренных широт от поглощенной ΦAP близка к линейной.

4. Явление Эль-Ниньо - Южное колебание (ENSO), воздействуя на приход солнечной радиации через изменение количества облачности, оказывает ключевое влияние на межгодовую изменчивость GPP и E влажных тропических лесов в условиях среднегорья в Индонезии. Вопреки существующим представлениям, изменение режима температуры и осадков в период кульминации теплой фазы ENSO влияния на нетто-экосистемный обмен CO_2 (NEE), GPP и E влажных тропических лесов не оказывает.
5. Снижение притока питательных веществ к растениям при изменении условий внешней среды в будущем для лесов тропических и умеренных широт может служить сдерживающим фактором роста GPP , NEE и E , вызванного увеличением скорости ассимиляции растений при росте температуры и содержания CO_2 в воздухе.

Научная новизна работы

1. Впервые разработан комплекс процесс-ориентированных моделей, позволяющий смоделировать тепло-, H_2O - и CO_2 -обмен в смешанных древостоях на основе сопряженного описания процесса фотосинтеза и транспирации с учетом индивидуальных физиологических особенностей различных пород деревьев.
2. Впервые получены данные по структуре и временной изменчивости потоков H_2O и CO_2 в вечнозеленых влажных тропических лесах, произрастающих в условиях среднегорья в Индонезии.
3. Впервые на основе экспериментальных данных и результатов модельных расчетов выявлена устойчивая зависимость межгодовой изменчивости E и GPP влажного тропического леса, произрастающего в условиях среднегорья в Индонезии от фазы и интенсивности ENSO.
4. В ходе анализа установлено, что основным фактором, определяющим зависимость E и GPP от фазы и интенсивности ENSO, является режим приходящей солнечной радиации.

5. На основе использования авторских моделей получены количественные оценки возможных изменений составляющих тепло-, H_2O - и CO_2 -обмена при сплошных рубках в еловых лесах в умеренных широтах и при обезлесении в зоне влажных тропических лесов в Индонезии.
6. На основе расчетов по математической модели с применением имеющихся реконструкций растительности и климата позднеледниковья и голоцена восстановлена динамика NEE , GPP , E_p и E лесных растительных сообществ, произрастающих в центральной части ЕТР на протяжении последних 12 тыс. лет.
7. По результатам модельных расчетов спрогнозировано возможное изменение потоков CO_2 и H_2O в лесах умеренных и тропических широт при изменении климатических условий, видового состава растительности и режима минерального питания лесов на период до конца XXI в.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая значимость исследования заключается в получении на основании экспериментальных подходов и авторских моделей новых представлений, результатов и выводов, позволяющих расширить спектр современных знаний о процессах взаимодействия лесов и климатической системы в прошлом, настоящем и будущем.

Разработанный комплекс математических моделей может найти широкое применение для решения различных теоретических, а также прикладных задач экологии, лесоведения и метеорологии. В частности, модели могут быть использованы при оценках состояния лесных экосистем и экосистемных услуг, что необходимо для решения задач формирования системы принятия экологически безопасных хозяйственных решений.

Результаты модельных исследований, выполненных в ходе реализации проектов Gr738/16-1 и Gr738/16-2 немецкого научно-исследовательского сообщества DFG, были использованы Региональным департаментом лесного хозяйства Северо-западной Германии (Nordwestdeutschen Forstlichen

Versuchanstalt) для проведения лесовосстановительных мероприятий в Золлинговском национальном парке (Германия).

При проведении экологической экспертизы территории аэропорта г. Франкфурта на Майне в Германии с помощью разработанной модели Mixfor-SVAT была выполнена оценка возможных негативных последствий для окружающей среды вырубке части Келстербахского леса в связи со строительством новой взлетно-посадочной полосы.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на ежегодных ассамблеях Европейского геофизического сообщества в 2001-2003, 2005-2010, 2012-2015 г.г., на Всемирном конгрессе географического союза в Германии, Японии и России в 2012, 2013 и 2015 г.г. на российских и международных конференциях "Modeling forest production (Scientific tools, Data needs and sources, Validation and application)" в Австрии в 2004 г., "European Conference on Ecological Modeling" в России и Италии в 2005 и 2007 г.г., "Математическое моделирование в экологии (ЭкоМатМод)" в Пущино в 2009, 2011, 2013 и 2015 г.г., "Climate change and their impact on boreal and temperate forests" в Екатеринбурге в 2006 году, "Regional Forest Responses to Environmental Change" в США в 2006 году, "Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии" в Пущино в 2007 г., "Принципы и способы сохранения биоразнообразия" в Пущино в 2008 г., "Interaction of man and environment in boreal forest zone: past, present and future" в ЦЛГПБЗ (Тверская обл.) в 2008 г., "Canopy Processes in a Changing Climate" в Австралии в 2010 г., "Факторы устойчивости растений в экстремальных природных условиях и техногенной среде" в Иркутске в 2013 г., и др..

Личный вклад автора

Автором лично разработан комплекс процесс-ориентированных моделей тепло-, H₂O- и CO₂-обмена (Mixfor-SVAT, Mixfor-3D, SVAT-Regio) в системе "почва - растительность - атмосфера" в локальном и региональном масштабах,

адаптированных к реальной структуре растительных сообществ сложного видового состава.

Определены необходимые входные параметры в моделях, а также проведена проверка их адекватности по данным измерений потоков в различных типах лесных экосистем в контрастных условиях умеренных и тропических широт.

Выполнен комплекс модельных расчетов по оценке влияния условий внешней среды на потоки тепла, H_2O и CO_2 в различных растительных сообществах.

Разработаны алгоритмы пространственной интерполяции полей метеорологических величин в региональном масштабе.

В еловых лесах Национального парка Золлинг в Германии автором лично проведены микроклиматические наблюдения и измерения потоков H_2O и CO_2 , а также измерения дыхания почвы, скорости фотосинтеза, дыхания и транспирации хвои ели, скорости движения влаги по ксилеме деревьев. Лично проведена обработка, анализ и интерпретация данных наблюдений.

Проведен комплексный анализ и интерпретация данных измерений потоков H_2O и CO_2 , а также результатов экофизиологических и микроклиматических наблюдений во влажных тропических лесах в Индонезии.

Проведен анализ и интерпретация данных экспериментальных наблюдений и результатов модельных расчетов для оценки влияния явления ENSO на потоки тепла, H_2O и CO_2 во влажных тропических лесах.

На основании имеющихся реконструкций истории развития растительности и климата выполнены модельные расчеты и получены данные о динамике NEE , GPP , E_p и E лесов в позднеледниковье и голоцене для центральной части ЕТР.

Для сценария будущих климатических изменений SRES (Special report on emission scenarios) A1B проведены модельные расчеты и получены количественные оценки возможных изменений составляющих H_2O - и CO_2 -обмена лесных экосистем в XXI веке.

Научные публикации по теме диссертации

Результаты исследований, проведенных в рамках данной диссертационной работы, представлены в главах 4-х коллективных монографий, в 40 научных статьях в зарубежных и отечественных рецензируемых журналах (из них 34 - в изданиях, рекомендованных ВАК), а также в 112 публикациях в материалах российских и международных научных конференций и конгрессов.

Организация исследований

Разработка модельных подходов и проведение полевых экспериментов по изучению пространственно-временной изменчивости составляющих тепло-, H₂O- и CO₂-обмена различных типов лесных экосистем, и оценке их чувствительности к изменению условий внешней среды была выполнена в рамках как плановых научных исследований ИПЭЭ РАН, так и в рамках российских и международных научно-исследовательских проектов, поддержанных Российским Фондом Фундаментальных Исследований, Российским Научным Фондом, программами фундаментальных исследований отделения биологических наук РАН "Биоразнообразие и динамика генофондов" и "Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга", программами научно-технического сотрудничества Европейского сообщества INTAS и INCO-Corpernicus, немецкого министерства науки и технологий (BMBF), немецкого научно-исследовательского сообщества (DFG), Национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA, США).

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность проф. Н.Н. Выгодской за творческую помощь, оказанную при обсуждении научной концепции данной работы, проф. Г. Гравенхорсту (Prof. Dr. G. Gravenhorst) за полезные советы и ценные рекомендации при проведении экспериментальных и модельных исследований, а также моим коллегам из Лаборатории Биогеоценологии им. В.Н. Сукачева ИПЭЭ РАН и Института Биоклиматологии Геттингенского Университета (Германия) за поддержку при проведении данного исследования.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, восьми глав и заключения. Она изложена на 306 страницах машинописного текста, включает 149 рисунков и 16 таблиц, а также содержит список литературы из 312 наименований.

Глава 1. Существующие подходы к моделированию тепло-, H₂O- и CO₂-обмена в системе "почва - растительность - атмосфера"

Математические модели тепло-, H₂O- и CO₂-обмена между земной поверхностью и атмосферой в настоящее время являются эффективным инструментом для описания потоков тепла, H₂O и CO₂ в различных пространственных и временных масштабах. Они основаны на сопряженном описании физических и биологических процессов в почве, растительности и приземном слое атмосферы, и в зависимости от задач исследований, структуры и свойств РП и почвы, а также пространственного и временного масштаба, могут иметь различную степень сложности и детализации при описании обменных процессов. В литературе модели данного класса обычно называют ПРАП (Почва - Растительность - Атмосфера - Перенос) или SVAT (Soil - Vegetation - Atmosphere - Transfer) моделями.

В развитии моделей тепло-, H₂O- и CO₂-обмена между земной поверхностью и атмосферой можно выделить 3 основных этапа (Sellers et al., 1997). На первом этапе в моделях использовались относительно упрощенные подходы при описании механизмов тепло-, H₂O- и CO₂-обмена, которые обычно основывались на уравнениях радиационного, теплового и водного баланса, а также на полуэмпирических соотношениях, не учитывающих биологические механизмы регуляции процессов испарения, фотосинтеза и дыхания растений (Penman, 1948; Thornthwaite, 1948; Будыко, 1948; Monsi, Saeki, 1953; Будаговский, 1964; Manabe, 1969; Monteith, 1977; Будаговский, Лозинская, 1976; и др.).

Второй этап характеризуется широким развитием комплексных биофизических моделей, позволяющих учесть биологические механизмы регуляции процессов транспирации и фотосинтеза растений на основе

механизмов устьичной регуляции (Monteith, 1965; Менжулин, 1970; Росс, 1975; Jarvis, 1976; Тооминг, 1977; Бихеле с соавт., 1980; Сиротенко, 1981; Sellers et al. 1986; Choudhury, Monteith, 1988; Полуэктов, Василенко, 1992; Гусев с соавт., 2005; Гусев, Насонова, 2010; и др.).

Третий этап был связан с началом интенсивных исследований по определению влияния климатических изменений и, в особенности, увеличения содержания CO_2 и других парниковых газов в атмосфере на структуру биогеохимического и гидрологического цикла поверхности суши и океана. Он основан на сопряженном описании процессов тепло-, H_2O - и CO_2 -обмена между земной поверхностью и атмосферой и комплексном описании биофизических и биохимических процессов в растительности и почве (Wong et al., 1979; Farquhar et al., 1980; Ball et al., 1980; Collatz et al., 1991, 1992; Leuning, 1995; Sharkey et al., 2007).

Глава 2. Математические модели H_2O - и CO_2 -обмена в лесных экосистемах

В главе представлен разработанный комплекс авторских процессориентированных моделей для описания тепло-, H_2O - и CO_2 -обмена между земной поверхностью и атмосферой в различных пространственных и временных масштабах. В качестве основной концепции в моделях использовано сопряженное описание физических и биологических процессов, протекающих на различных иерархических уровнях экосистемы: от уровня отдельного листа до уровня отдельного дерева (растения) и всей экосистемы в целом. Компьютерные программы для моделей написаны в среде Фортран. Общий объем разработанного программного продукта составляет около 34000 операторов.

Расчет тепло-, H_2O - и CO_2 -обмена в моделях основан на подробном описании: переноса коротковолновой солнечной и длинноволновой радиации внутри растительности; турбулентного и конвективного переноса тепла, H_2O и CO_2 внутри растительности и в пределах приземного слоя атмосферы; транспирации, движения влаги в растениях, изменения запасов влаги в листьях и стволе (стебле) растений; испарения перехваченных (задержанных)

растительностью атмосферных осадков; испарения с поверхности почвы; фотосинтеза и дыхания растений; гетеротрофного и автотрофного дыхания почвы; переноса тепла и влаги в почве (Рис. 1).

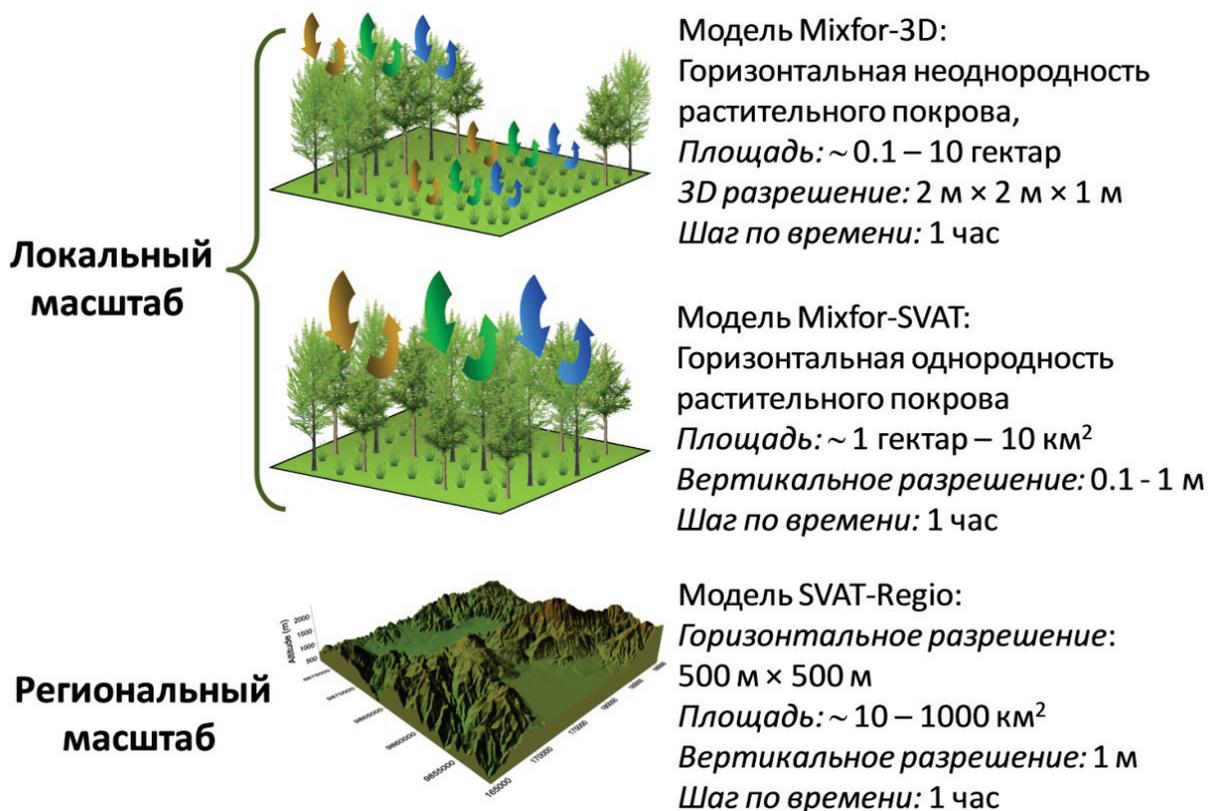


Рис. 1. Модели для описания процессов H₂O- и CO₂-обмена в лесных экосистемах.

Раздел 2.1. Одномерная модель Mixfor-SVAT для описания H₂O- и CO₂-обмена в смешанных древостоях

Одномерная процесс-ориентированная математическая модель MixFor-SVAT была разработана для расчета потоков радиации, тепла, H₂O и CO₂ как в монодоминантных, так и в разновозрастных смешанных древостоях (Ольчев с соавт., 2008, 2009; Olchev et al., 2002, 2008, 2009). Основным преимуществом модели является ее способность не только определить интегральные потоки H₂O и CO₂ на уровне всей экосистемы, но также и адекватно оценить вклад почвы, лесной подстилки, а также деревьев разных пород в суммарные потоки с учетом их индивидуальной реакции на изменения условий внешней среды, фенологии, а также различий в структуре и биофизических свойствах. Сопряженное описание

H_2O - и CO_2 -обмена между древостоем, почвой и атмосферой, а также учет нестационарности переноса влаги в древесных растениях и ее накопления, позволяет адекватно смоделировать, суточную динамику фотосинтеза и E_T деревьев при различных метеорологических и почвенных условиях. Применение подхода Фаркхара (Farquhar et al., 2008) для описания процесса фотосинтеза позволяет проводить расчеты скорости ассимиляции CO_2 растениями с учетом возможных изменений запасов минеральных веществ в растениях и почве, а также содержания CO_2 в воздухе. В качестве верхних граничных условий модель использует данные по температуре и влажности воздуха, скорости ветра, концентрации CO_2 , количеству осадков и суммарной солнечной радиации. В модели подробно учитывается структура растительности и основных почвенных горизонтов, определяются индивидуальные оптические и экофизиологические (максимальная устьичная проводимость, скорость фотосинтеза и дыхания, их зависимости от параметров внешней среды, и др.) параметры для основных пород деревьев и растительности нижних ярусов.

Раздел 2.2. Трехмерная модель Mixfor-3D для описания переноса солнечной радиации, турбулентного тепло-, H_2O - и CO_2 -обмена в пространственно неоднородном РП

Трехмерная модель Mixfor-3D разрабатывалась для описания процесса переноса солнечной радиации, турбулентного и конвективного тепло-, H_2O - и CO_2 -обмена в горизонтально и вертикально неоднородных лесных экосистемах (Ольчев, Радлер, 2009; Olchev et al., 2009; Widlowski et al., 2011). В отличие от одномерных моделей, предполагающих горизонтальную однородность РП, Mixfor-3D позволяет смоделировать процессы переноса в древостоях с произвольной пространственной структурой и видовым составом, произрастающих на поверхности со сложным и неоднородным рельефом. На основе данных о положении отдельных деревьев в древостое, их высоте, диаметре и высоте крепления кроны, вертикальном и горизонтальном распределении площади листьев, информации о биофизических свойствах растительности и

почвенного покрова, модель позволяет описать мозаичную структуру поля солнечной радиации и температуры, неоднородность турбулентного обмена тепла, H_2O и CO_2 , внутри и над РП. При расчетах учитывается неоднородность почвенного покрова и травяного яруса под пологом леса. В качестве входных параметров для расчетов используются непрерывные ряды измерений основных метеорологических параметров над верхней границей РП с шагом по времени 1 час.

Раздел 2.3. Модель SVAT-Regio для описания тепло-, H_2O - и CO_2 -обмена в региональном масштабе

Модель SVAT-Regio является развитием упрощенной версии Mixfor-SVAT модели для описания процессов тепло-, H_2O - и CO_2 -обмена в региональном масштабе (Ольчев, 2003; Olchev et al., 2008). Она адаптирована для различных типов подстилающей поверхности, включая территории, покрытые лесной и травяной растительностью, а также водные объекты (озера, водохранилища).

В качестве основных входных параметров модель использует:

- Стандартные ряды метеорологических наблюдений по температуре и влажности воздуха, скорости и направлению ветра, осадкам и суммарной солнечной радиации.
- Оцифрованные карты рельефа, гидрографии, структуры землепользования, растительности и почв.
- Основные параметры, определяющие структуру растительности (листовой индекс, высота, пространственная ориентация фитоэлементов и вертикальная структура РП) в пределах каждой выделенной ячейки на земной поверхности.
- Биофизические параметры для выделенных групп растительности.

Модель позволяет проводить пространственную интерполяцию метеорологических параметров даже при наличии сильно разреженной сети наблюдений, выполнять расчеты составляющих тепло-, H_2O - и CO_2 -обмена между

земной (водной) поверхностью и атмосферой как для каждой ячейки регулярной сетки, так и для всей исследуемой территории за различные интервалы времени.

Глава 3. Методы определения потоков тепла, H₂O и CO₂ в лесных экосистемах в полевых условиях

В главе дан краткий обзор существующих подходов для определения составляющих тепло-, H₂O- и CO₂-обмена растительных сообществ в полевых условиях. Основное внимание сосредоточено на методах турбулентных пульсаций, экспозиционных камер и потока пасоки. Дана краткая характеристика методов, определены границы их применения, имеющиеся ограничения и возможные источники погрешностей.

Раздел 3.1. Метод турбулентных пульсаций

Метод турбулентных пульсаций (eddy covariance) разработан для проведения непрерывных измерений турбулентных потоков момента импульса, тепла, водяного пара, CO₂, а также других газовых компонент между земной поверхностью и атмосферой (Montgomery, 1948; Обухов, 1951; Цванг, 1960, 1963; Елагина, 1962; Baumgartner, 1969; Кухарец, Цванг, 1976; Baldocchi et al., 1988; Foken, Wichura, 1996; Lee et al., 2004; Burba, Anderson, 2010; Eddy covariance..., 2012). Метод основан на частном решении общего уравнения сохранения массы, которое проинтегрировано по некоторому объему с учетом осреднения Рейнольдса (Finnigan et al., 2003). Результирующий поток определяется как ковариация высокочастотных (10-20 Гц) пульсаций вертикальной составляющей скорости ветра и пульсаций концентрации соответствующей субстанции. Основными условиями, необходимыми для корректного применения метода, является горизонтальная однородность подстилающей поверхности и интенсивное турбулентное перемешивание в приземном слое воздуха. Для заполнения пропусков в рядах экспериментальных данных, обусловленных слабым турбулентным обменом, интенсивными осадками, высокой относительной влажностью воздуха, перебоями энергоснабжения, программными сбоями, нестационарностью временных рядов, и т.д., используется широкий спектр

методов, среди которых одним из наиболее перспективных является подход, основанный на применении процесс-ориентированных математических моделей (Eddy covariance, 2012).

Раздел 3.2. Измерения H_2O - и CO_2 -обмена с помощью метода экспозиционных камер

Метод экспозиционных камер широко используется при проведении точечных измерений H_2O - и CO_2 -обмена между поверхностью почвы (Кудеяров, Курганова, 2005; Молчанов, 2007; Janssens et al., 2001) или элементами растительности (Цельникер с соавт., 1993; Sullivan et al., 1996; Olchev et al., 2009) с окружающим воздухом. Для определения интенсивности газообмена внутри камеры применяются открытая и закрытая схемы. Полученные данные используются как для описания видоспецифических особенностей и масштабов пространственно-временной изменчивости скорости фотосинтеза, транспирации и дыхания растений различных видов и дыхания почвы, так и для параметризации математических моделей H_2O - и CO_2 -обмена.

Раздел 3.3. Измерение потока влаги и транспирации растений с помощью метода потока пасоки

Метод потока пасоки (sap flow) позволяет проводить измерения скорости транспирации, как отдельных деревьев, так и всего древостоя в целом. Расчет скорости потока влаги основан на измерениях температурных градиентов, возникающих внутри ксилемы при искусственном нагреве (Swanson, 1967; Čermák et al., 1973, 2004; Кайбияйнен с соавт., 1981; Granier, 1985; Nadezhdina et al., 2002). Основным преимуществом метода является возможность получения данных о пространственно временной изменчивости E_T внутри РП, определение E_T отдельных деревьев и небольших растительных сообществ, а также сообществ, произрастающих на неоднородных участках земной поверхности со сложным рельефом, когда применение других методов (например, метода турбулентных пульсаций) невозможно или серьезно затруднено. Метод потока пасоки является,

в частности, единственным методом, позволяющим оценить вклад различных пород деревьев в смешанных древостоях в суммарное испарение.

Глава 4. Определение входных параметров и проверка адекватности моделей тепло-, H₂O- и CO₂-обмена

Глава посвящена описанию основных объектов экспериментальных и модельных исследований, характеристике основных структурно-функциональных параметров растительности и почвы исследуемых экосистем, необходимых для проведения модельных экспериментов, а также представлению результатов проверки адекватности разработанных моделей.

Раздел 4.1. Основные объекты экспериментальных и модельных исследований

Представление основных объектов исследования, вечнозеленых влажных тропических лесов Индонезии, еловых и смешанных лесов Центральной Европы и ЕТР, включало описание климатических условий, структуры и видового состава РП, а также оборудования, использованного для проведения мониторинговых наблюдений за составляющими тепло-, H₂O- и CO₂-обмена.

1). Участок влажного тропического леса расположен в южной части национального парка Лоре Линду вблизи населенного пункта Барири (01°39' ю.ш., 120°10' в.д.) в Индонезии. Высота леса над уровнем моря - около 1420 м. РП отличается высоким видовым разнообразием и значительной вертикальной неоднородностью. Количество видов древесных растений на гектар превышает 90. Максимальная высота деревьев достигает 36 м., средняя высота древостоя не превышает 21 м. Древостой разновозрастный, максимальный возраст составляет 200-300 лет. Доминирующими видами древесных растений являются каштанник или кастанопсис острейший (*Castanopsis accuminatissima* (Blume) A.), канариум обыкновенный (*Canarium vulgare* Leenh.) и различные виды фикусов, включая фикус Шварца (*Ficus schwarzii* Koord.), сулавесский фикус (*Ficus sulawesiana* C.C.Berg & Culmsee), и др.). Измерения вертикальных потоков H₂O и CO₂

проводились методом турбулентных пульсаций с помощью оборудования, установленного на 70 метровой метеорологической вышке над РП.

2). Монодоминантный еловый лес (*Picea abies* [L]. Karst), выбранный в качестве второго модельного объекта, расположен в центральной части Германии на обширном плато в центральной части Золлинговской возвышенности (51°45' с.ш., 9°34' в.д., около 505 м. над уровнем моря). Средняя высота деревьев 30 м. Возраст - 115 лет. Оборудование для пульсационных измерений потоков H₂O и CO₂ было установлено на 50 метровой вышке на нескольких уровнях над лесом, а также под пологом леса на высоте 2 м. Кроме того, под пологом леса были установлены: экспозиционные камеры для проведения измерений дыхания почвы, корней и стволов деревьев; оборудование для измерения E_T методом потока пасоки.

3). Выбранный в качестве третьего модельного объекта смешанный хвойно-мелколиственный лес (ельник мелкотравно-зеленомошный), расположен в верховьях Волги вблизи озера Пено (56°58' с.ш., 32°52' в.д.) в юго-западной части Валдайской возвышенности на ЕТР. В древостое доминирует ель обыкновенная (*Picea abies* (Karst) L.) с добавлением березы повислой (*Betula pendula* Roth), осины обыкновенной (*Populus tremula* L.) и ольхи серой (*Alnus incana* L.). Средняя высота древесного яруса составляла 25 м., возраст - 80-120 лет. На экспериментальной площади проводились измерения динамики E_T у взрослых деревьев и подроста различных пород с помощью метода потока пасоки.

Раздел 4.2. Определение входных параметров моделей, определяющих биофизические свойства растительности и почвы

Значения входных параметров математических моделей, определяющих структуру РП (листовой индекс, высота деревьев, высота крепления кроны, глубина корневой системы, диаметр ствола, и др.), оптические свойства фитоэлементов древесных растений, экофизиологические параметры (скорость фотосинтеза и темнового дыхания, устьичная проводимость листьев), физические свойства ксилемы деревьев (гидравлическая проводимость ксилемы,

влажностемкость, и др.), физические свойства различных типов почв (коэффициент теплопроводности, гидравлическая проводимость, полная влагоемкость, и др.) в выбранных экосистемах были получены как в ходе прямых измерений и расчетов, так и из литературных источников.

Для определения параметров фотосинтеза (максимальных скоростей карбоксилирования РБФК/О, переноса электронов для регенерации акцептора РБФ, утилизации триозофосфатов), темнового дыхания и устьичной проводимости листьев древесных растений, а также зависимости этих параметров от условий внешней среды, в исследовании использовались данные измерений с помощью портативных газоанализаторов Li-6200 и Li-6400 (Li-Cor, США), CMS-400 (Heinz Walz, Германия), а также портативного диффузионного порометра нулевого равновесия LI-1600 (Li-Cor, США).

Оптические свойства (коэффициенты отражения и пропускания) древесных растений на экспериментальных площадях в Золлинге и Пено определялись с помощью портативного спектрорадиометра Li-1800 (Li-Cor, США). Значения оптических параметров различных пород древесных растений во влажном тропическом лесу в Индонезии были аппроксимированы с использованием литературных данных (Lee, Graham, 1986; Knapp, Carter, 1998; и др.).

Гетеротрофное и автотрофное дыхание почвы определялось методом экспозиционных камер. Измерения проводились по закрытой схеме с помощью инфракрасных газоанализаторов Li-6251, Li-6262, Li-820 и Li-840A (Li-Cor, США). Для определения вклада гетеротрофного дыхания проводились параллельные измерения дыхания на изолированных участках почвы с заранее извлеченными корнями, а также прямые измерения скорости дыхания тонких корней.

Раздел 4.3. Проверка адекватности моделей

Для проверки адекватности разработанного комплекса математических моделей использовались данные наземных измерений потоков H_2O и CO_2 , полученные методами турбулентных пульсаций, экспозиционных камер и потока

пасоки, результаты микроклиматических наблюдений внутри и над РП, а также данные измерений температуры и влажности почвы. Основное внимание в ходе проверки было направлено на точность воспроизведения моделями как внутригодовой, так и внутрисуточной изменчивости анализируемых параметров.

Проверка адекватности Mixfor-SVAT модели проводилась с применением результатов полевых наблюдений во влажном тропическом лесу в национальном парке Лоре Линду в Индонезии (Falk et al., 2005; Olchev et al., 2008; Ibrom et al., 2007; Olchev, Gravenhorst, 2015), в еловом лесу в Золлинге и Тарандте в Германии (Ольчев, 1998; Oltchev et al., 1996, 1997; Falge et al., 2005), в смешанных лесах вблизи п. Хайних (Германия) и на ЕТР в верховьях Волги вблизи п. Пено (Oltchev et al., 2002), а также в двух типах травянистых экосистем в Мелпитце и Линденберге в Германии (Falge et al., 2005; Bernhofer et al., 2005).

Для проверки правильности алгоритма пространственной интерполяции данных метеорологических наблюдений и точности воспроизведения суточной динамики метеорологических элементов по их среднесуточным значениям в модели SVAT-Regio были использованы данные измерений сети мобильных метеорологических станций в парке Лоре Линду в Индонезии (Ibrom et al., 2007; Olchev et al., 2008) и в Золлинге в Германии. Сравнение потоков, смоделированных SVAT-Regio моделью и измеренных в полевых условиях, проводилось с применением данных измерений потоков H_2O и CO_2 во влажном тропическом лесу (Olchev et al., 2008) и на плантации какао (Falk et al., 2005) в парке Лоре Линду (Индонезия), а также в еловом лесу Золлинга (Германия).

Проверка адекватности модели Mixfor-3D была выполнена на основе данных непрерывных микроклиматических наблюдений и результатов измерений потоков влаги по ксилеме молодых и взрослых деревьев на сплошной вырубке и в окружающем вырубку древостое в Золлинге в центральной Германии (Olchev et al., 2009; Ольчев, Радлер, 2009; Radler et al., 2010).

Представленные в разделе результаты показали, что разработанные модели позволяют адекватно описать пространственно-временную изменчивость радиационного режима РП, вертикальные потоки H_2O и CO_2 над РП,

микроклиматические условия приземного слоя воздуха, температурный и влажностный режим почвы лесных и травяных экосистем разного видового состава, расположенных в различных географических регионах с разными климатическими условиями в широком спектре погодных условий и условий почвенного увлажнения (Olchev et al., 1996, 2002, 2008, 2009; Falge et al., 2005; Ольчев с соавт., 2008, 2009; и др.).

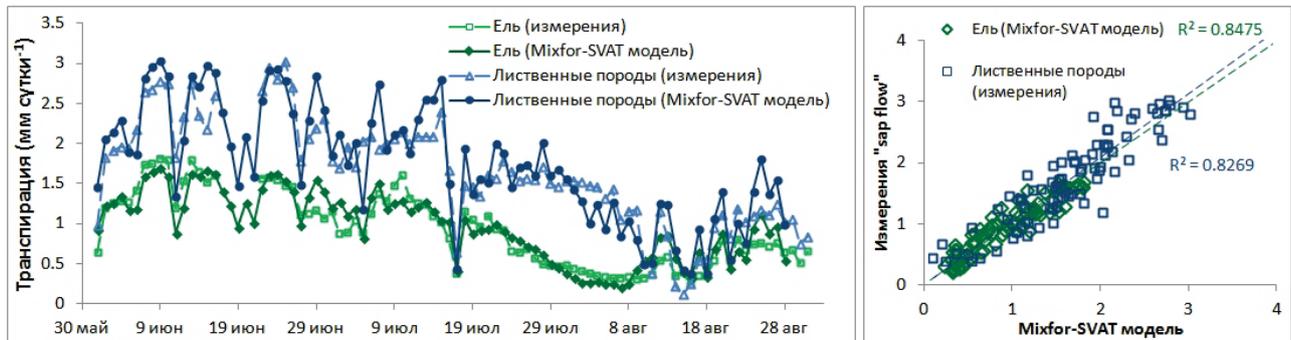


Рис. 2. Сравнение временной изменчивости смоделированных и измеренных (методом "потока пасоки") значений E_T за сутки в период засухи в 1999 году в сообществе смешанного леса вблизи п. Пено.

Результаты проверки адекватности модели Mixfor-SVAT для елового леса в Золлинге показали, что модель позволяет описать 95% изменчивости Rn , 75% - затрат тепла на турбулентный теплообмен, (H), 52% - затрат тепла на фазовые преобразования воды (λE) и 73% - NEE . Схожая высокая корреляционная зависимость прослеживается и при сравнении смоделированных и измеренных потоков в условиях хорошо выраженной турбулентности для смешанного лиственного леса в Хайнихе (Германия). Коэффициент детерминации (r^2) между значениями смоделированных и измеренных потоков составляет: 0.96 для Rn , 0.83 для H , 0.73 для λE , и 0.86 для NEE (при $p < 0.05$). В ходе сравнения измеренных и смоделированных потоков H_2O и CO_2 в смешанном древостое вблизи п. Пено на примере аномально жаркого и сухого лета 1999 г. удалось показать способность модели адекватно описать различия в динамике E_T хвойных и лиственных пород деревьев (Рис. 2). Модель позволила описать 84.8% изменчивости транспирации ели и 82.7% изменчивости транспирации лиственных пород деревьев.

В ходе проведенного сравнения расчетов по трехмерной модели Mixfor-3D с данными инструментальных наблюдений на сплошной вырубке в Золлинге (Германия) было показано, что модель позволяет описать от 92 до 99% временной изменчивости солнечной радиации в пределах вырубки ($r^2=0.92-0.99$, $p<0.05$), и 79% - внутри лесного полога ($r^2=0.79$, $p<0.05$). Коэффициент r^2 между смоделированными и измеренными значениями температуры почвы на глубине 10 и 20 см для всех точек наблюдений изменялся в пределах от 0.82 до 0.97 (при $p<0.05$).

Глава 5. Опыт применения модели Mixfor-SVAT для оценки временной изменчивости H₂O- и CO₂-обмена во влажных тропических и еловых лесах умеренных широт

В главе показано применение разработанной математической модели Mixfor-SVAT для восстановления непрерывных рядов данных по потокам CO₂ и H₂O в лесных экосистемах и получение с их помощью количественных оценок о межгодовой, сезонной и внутрисуточной изменчивости составляющих H₂O- и CO₂-обмена на примере исследуемых влажных тропических и еловых лесов умеренных широт в условиях современного климата. При анализе особое внимание уделялось рассмотрению динамики потоков в периоды аномально жаркой и засушливой погоды. Расчеты по математической модели Mixfor-SVAT использовались для восстановления непрерывных рядов данных по потокам H₂O и CO₂ в исследуемых лесных экосистемах в периоды, в которые измерения не проводились или потоки определялись с погрешностями в силу слабой турбулентности приземного слоя воздуха, интенсивных осадков, и др. Для влажного тропического леса в Индонезии доля пропусков в рядах наблюдений, обусловленных различными причинами, составляла 71%, а для елового леса Золлинга - 48%. Принятые в настоящее время традиционные методы для заполнения пропусков в рядах измерений (Falge et al., 2001; Papale et al., 2006; Richardson et al., 2006; Moffat et al., 2007; Eddy covariance..., 2012) основаны преимущественно на упрощенных подходах, не учитывающих в полной мере

режим турбулентности и конвективные движения воздуха внутри РП, индивидуальный отклик разных пород деревьев на изменения условий внешней среды, нестационарность переноса влаги в растениях, влияние атмосферных осадков на потоки и др.

Раздел 5.1. H₂O- и CO₂-обмен влажных тропических лесов

Процессы H₂O- и CO₂-обмена в исследуемых влажных тропических лесах в парке Лоре Линду в Индонезии определяются жарким и влажным климатом, формирующимся главным образом под влиянием экваториальных муссонов. Существенное влияние на климатические условия региона оказывает также явление ENSO. Среднегодовая температура воздуха в районе исследований составляет 19.1°C. Среднегодовое количество осадков превышает 2000 мм в год.

На основании комплексного подхода, использующего данные прямых измерений и модельных расчетов потоков H₂O и CO₂, было получено, что за период наблюдений с 2004 по 2008 годы интегральные годовые суммы *GPP* исследуемых влажных тропических лесов изменялись в пределах от 3060-3220 гС м⁻² год⁻¹, а дыхание экосистемы (*RE*) от 2210 до 2390 гС м⁻² год⁻¹ (Ibrom et al., 2008; Panferov et al., 2009; Olchev, Gravenhorst, 2015). Годовой ход *GPP* и *NPP* определялся, прежде всего, сезонной изменчивостью приходящей суммарной солнечной радиации. Максимальные значения *GPP*, как и *NPP*, наблюдались в наименее влажный и малооблачный период года с августа по октябрь (*GPP* - 278.3±13.4 гС м⁻² мес⁻¹ в октябре, и *NPP* - 112.0±13.3 гС м⁻² мес⁻¹ в августе), а минимальные, наоборот, в более влажный - в мае - июне и ноябре - декабре (Рис. 3). Наиболее высокие значения *RE* приходились на октябрь - декабрь (205.7±10.0 гС м⁻² мес⁻¹ в октябре) и были обусловлены главным образом максимальными значениями температуры воздуха в этот период.

Анализ внутригодовой изменчивости *NEE* показал, что исследуемый влажный тропический лес в течение всего года служил устойчивым стоком CO₂ из атмосферы (Рис. 3). Минимальные (по абсолютной величине) значения *NEE* наблюдались в апреле - июне и ноябре (-60...-70 гС м⁻² мес⁻¹), а максимальные - в

январе и августе ($-90 \dots -100 \text{ гС м}^{-2} \text{ мес}^{-1}$). По данным Луиссаерта с соавт. (Luysaert et al., 2008) поглощенный лесами CO_2 идет преимущественно на увеличение биомассы корней и запасов углерода в различных почвенных горизонтах, на прирост древесной биомассы, а также на естественный древесный опад (листва, ветви, кора). Можно предположить, что большая часть поглощенного CO_2 в исследуемом древостое из-за значительного количества выпадающих атмосферных осадков и высокой водопроницаемости верхних слоев почвы идет на увеличение запасов углерода в глубинных почвенных горизонтах. Из-за небольшого наклона поверхности в точке наблюдений значительная часть органического и неорганического почвенного углерода может вымываться из экосистемы с поверхностным стоком. При интенсивных ливневых осадках с поверхностным стоком также происходит вынос и накопившегося на поверхности почвы мелкого древесного опада. Некоторая часть CO_2 выносится из экосистемы с холодными стоковыми течениями воздуха в ночное время. Также необходимо учитывать, что часть накопленного экосистемой углерода возвращается в атмосферу при эмиссии растительностью и почвенным покровом метана и других углеродосодержащих газов (изопрена, этилена, и др.) (Kerpler et al., 2006). Определенная часть фитомассы утилизируется населяющими исследуемый район фитофагами (тонкский макак, бабирусс, и др.).

Внутригодовая изменчивость E и E_T определялась динамикой приходящей к земной поверхности солнечной радиации и изменением влажности воздуха. Максимальные значения E наблюдались в октябре ($136.0 \pm 4.2 \text{ мм}$) и были обусловлены максимальными значениями солнечной радиации и высоким дефицитом упругости водяного пара в воздухе. Несмотря на большое количество выпадающих осадков и высокий фон температуры в период с марта по июнь, E в этот период была значительно ниже сентябрьских и октябрьских значений и составляла около $104.7 \pm 8.4 \text{ мм}$ (в апреле). Вклад E_T в суммарное значение E за год составлял около 77%.

Годовой ход основных составляющих теплового баланса (R_n , H и λE) определялся главным образом режимом приходящей к поверхности солнечной

радиации. Максимальные значения Rn , H и λE наблюдались в октябре, а минимальные - в июне. Величина λE в течение всего года значительно превышала H . Среднемесячные значения отношения Боуэна ($\beta=H/\lambda E$) в течение года изменялись в пределах от 0.3 до 0.4. В суточном ходе в дневное время λE устойчиво превышали H ($\beta=0.50-0.55$). Среднегодовой значение λE составляло около 75% от величины Rn .

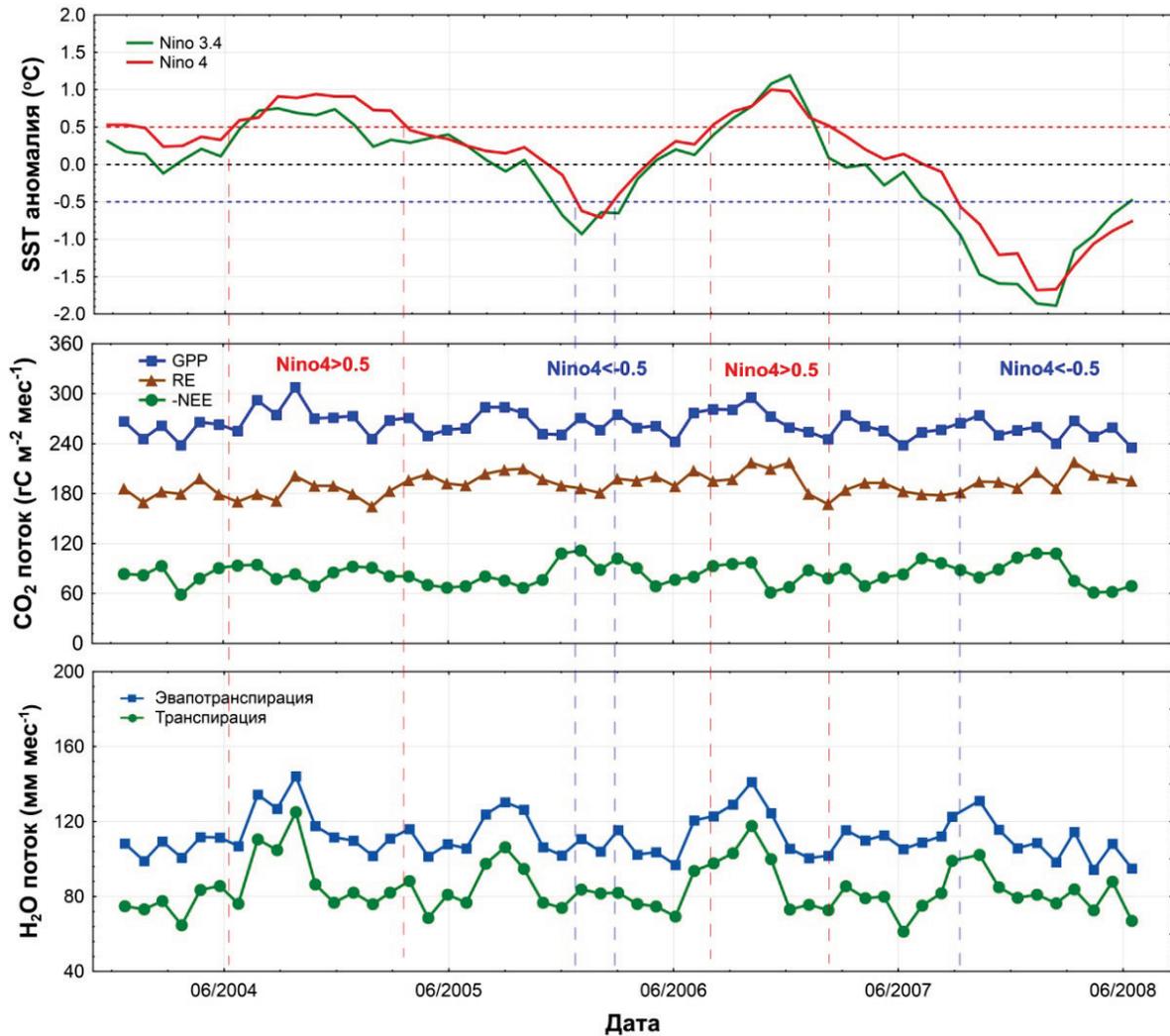


Рис. 3. Временная изменчивость среднемесячных значений индексов Эль-Ниньо Nino3.4 и Nino4, а также составляющих CO₂ (GPP , RE , NEE) и H₂O (E , E_T) баланса во влажном тропическом лесу вблизи Барири в Индонезии.

Результаты расчетов потенциального испарения или испаряемости (E_p) показали, что соотношение E/E_p для исследуемых влажных тропических лесов имело четко выраженный годовой ход с максимумом в июне 0.93 ± 0.03 и декабре

0.91 ± 0.04 , и минимумом в феврале и октябре - 0.84 ± 0.06 . Среднегодовое значение E/E_p составляло 0.880 ± 0.055 . Таким образом, величина E в течение всего года была близка к величине максимально возможного испарения при данных метеорологических условиях с достаточно хорошо увлажненной (мокрой) подстилающей поверхности или открытой водной поверхности (E_p).

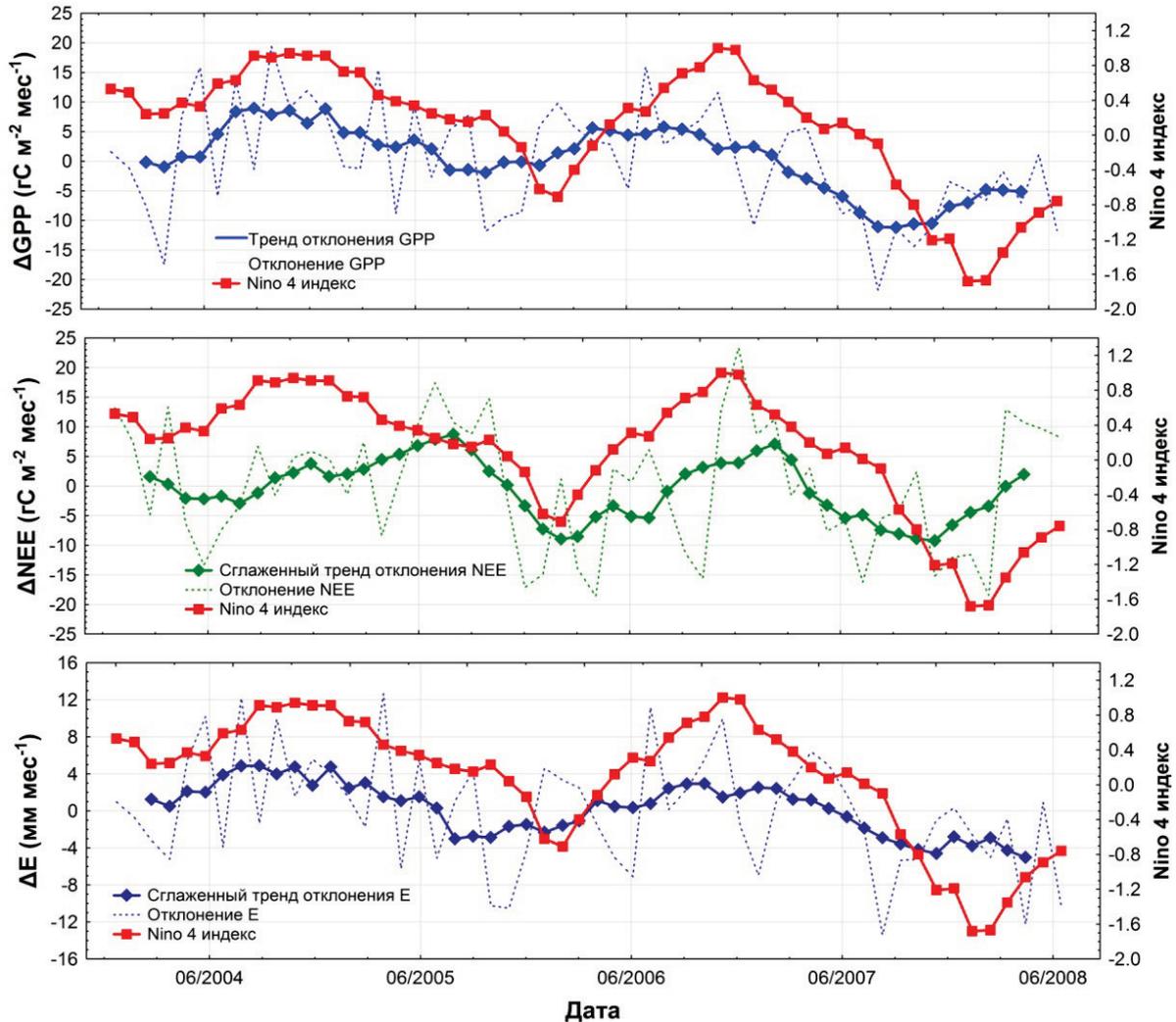


Рис. 4. Временная изменчивость индекса Niño 4 и отклонений месячных сумм GPP , NEE и E от их средних многолетних значений во влажном тропическом лесу вблизи Барири в Индонезии.

Анализ временной изменчивости индексов Niño3.4 и Niño4, характеризующих интенсивность явления ENSO в центральной части Тихого океана, позволил выявить существенное влияние как теплых (Эль-Ниньо), так и холодных (Ла-Нинья) эпизодов ENSO на динамику GPP ($r^2=0.52$, $p<0.05$) и E ($r^2=0.74$, $p<0.05$) влажных тропических лесов центрального Сулавеси (Рис. 4)

(Olchev et al., 2015). Движущим механизмом при этом была тесная зависимость между индексами ENSO и аномалиями приходящей солнечной радиации ($r^2=0.48$, $p<0.05$). Влияние ENSO на температуру было довольно незначительным ($r^2=0.15$, $p>0.05$). Атмосферные осадки, количество которых изменялось в зависимости от интенсивности ENSO, существенного влияния на составляющие H_2O - и CO_2 -обмена не оказывали. Это очевидно было связано с преобладающими в течение всего периода наблюдений (включая и периоды кульминации Эль-Ниньо) условиями достаточного почвенного увлажнения.

В ходе анализа было выявлено, что максимальные положительные аномалии приходящей солнечной радиации и *GPP* наблюдались примерно за два месяца до момента кульминации Эль-Ниньо. Этот временной сдвиг может быть связан с постепенным смещением в период усиления Эль-Ниньо области интенсивной конвекции из районов ее обычной локализации к центру Тихого океана. Процессы конвекции над Индонезией при этом ослабляются, что приводит к уменьшению облачности и увеличению притока солнечной радиации.

Природный феномен "Индоокеанский диполь" влияния на временную изменчивость метеорологических параметров и составляющих H_2O - и CO_2 -обмена влажных тропических лесов центрального Сулавеси в течение периода наблюдений, по нашим данным, не оказывал.

Раздел 5.2. H_2O - и CO_2 -обмен в еловых лесах умеренных широт Центральной Европы

Процессы H_2O - и CO_2 -обмена в еловых лесах умеренных широт Центральной Европы формируются в условиях умеренно-континентального климата под господствующим влиянием воздушных масс с Атлантического океана. Для региона лесного массива Золлинга среднегодовая температура воздуха составляет $+6.6^\circ C$, а годовое количество осадков достигает 1000 мм.

На основе данных полевых экспериментов и модельных расчетов, было показано, что за период с 1995 по 2001 годы интегральные годовые суммы *GPP* елового леса в Золлинге изменялись в пределах от 1180 до 1465 гС м⁻² год⁻¹, а *RE* -

от 740 до 995 гС м⁻² год⁻¹. Динамика *GPP* древостоя, определялась главным образом изменением приходящей к РП суммарной солнечной радиации ($r^2=0.68$, $p<0.05$), а также температурой приземного слоя воздуха ($r^2=0.53$, $p<0.05$). Величина *RE* зависела в основном от изменения температуры воздуха ($r^2=0.74$, $p<0.05$). В годовом ходе в период с марта по октябрь еловый лес служил устойчивым стоком, а с ноября по февраль - источником CO₂ для атмосферы. В летние месяцы *NEE* изменялся от 110 до 160 гС м⁻² мес⁻¹ (Рис. 5). В зимние месяцы *NEE* снижался до -20... -40 гС м⁻² мес⁻¹. Ключевым фактором, определяющим внутригодовую изменчивость *NEE* елового леса, как и в случае *GPP*, являлась приходящая солнечная радиация ($r^2=0.56$, $p<0.05$). Корреляционная связь между *NEE* и температурой воздуха отсутствовала ($r^2=0.02$, $p>0.05$).

Временная изменчивость *E* и *E_T* елового леса в Золлинге в течение периода измерений характеризовалась устойчивым годовым ходом с минимумом в зимние месяцы и максимумом в летний период (Рис. 4). В зависимости от погодных условий *E* в разные годы изменялась от 54.0 в июне 1996 г. до 83.2 мм мес⁻¹ в июле 1999 г. Доля *E_T* в суммарной *E* за год составляла около 73%.

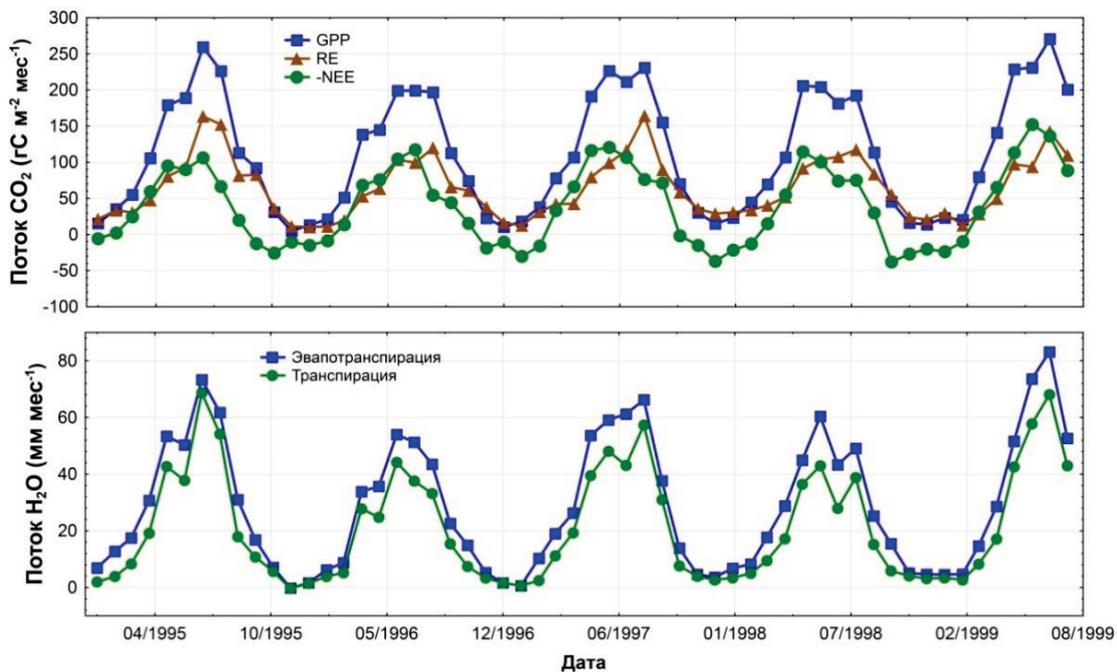


Рис. 5. Временная изменчивость составляющих CO₂ (*GPP*, *RE*, *NEE*) и H₂O (*E*, *E_T*) обмена в еловом лесу в Золлинге (Германия).

Динамика основных составляющих теплового баланса (H и λE) определяется как метеорологическими факторами (режимом солнечной радиации, температурой, дефицитом упругости водяного пара и количеством осадков), так и экофизиологическими свойствами растительности. Данные измерений показали, что в годовом ходе λE постоянно превосходили H за исключением периода с апреля по май, когда среднемесячные значения λE были близки к значениям H . Отношение Боуэна, рассчитанное по среднемесячным значениям H и λE в период положительных среднемесячных значений H , изменялось от 0.1 ± 0.2 в сентябре и 0.5 ± 1.4 в марте до 1.1 ± 0.3 в мае. В летние месяцы β изменялось от 0.6 до 0.9, что было значительно выше значений β , полученных для влажного тропического леса в Барири ($\beta=0.3-0.4$). В суточном ходе в дневное время значения H устойчиво превосходили λE ($\beta=1.2-1.6$). Вклад λE в годовой Rn за период измерений составил 74%, что хорошо соответствует оценкам, полученным для влажного тропического леса.

Соотношение E/E_p в период с апреля по август (вне зависимости от колебаний температуры, количества выпадающих осадков и условий почвенного увлажнения) изменялось от 0.83 в апреле до 0.66-0.68 в июне-июле. В холодный период года с октября по март величина E/E_p увеличивалась до 0.9-1.0. Среднегодовое значение E/E_p , рассчитанное за весь период инструментальных наблюдений, было 0.87 ± 0.15 , и оно также как и в случае отношений $\lambda E/Rn$ и E_T/E почти полностью совпадало со значениями E/E_p для влажного тропического леса.

Относительно непродолжительные периоды аномально жаркой погоды без осадков существенного влияния на динамику E_T елового леса в Золлинге не оказывали. Так, при уменьшении влажности верхнего слоя почвы до 65% от полной влагоемкости в период аномально жаркой погоды 2003 г., снижение дневной E_T составило менее 20%. Для сравнения, аномально жаркая и засушливая погода, наблюдавшаяся на ЕТР в 1999 г., привела к уменьшению влажности верхних слоев почвы в смешанном древостое в верховьях Волги вблизи Пено до 40% и падению E_T ели на 75%. При этом снижение E_T мелколиственных пород деревьев в древостое не превысило 45%. Высокая чувствительность ели к засухе

была обусловлена, прежде всего, поверхностной структурой ее корневой системы (сосредоточенной в слое почвы глубиной до 20 см), что характерно для территорий с преобладающим высоким залеганием грунтовых вод.

Раздел 5.3. Зависимость первичной продукции влажных тропических и еловых лесов умеренных широт от поглощенной растительным покровом ФАР

В разделе проведен анализ зависимости GPP и NPP древостоев от ФАР, поглощенной РП (aQ). Для расчетов использовались данные по месячным и суточным суммам GPP , NPP и aQ для влажного тропического леса в Барири в Индонезии и для елового леса в Золлинге в Центральной Германии, полученным с применением данных измерений и модельных расчетов. Для параметризации зависимости GPP и NPP от aQ использовался как классический подход, основанный на линейной зависимости GPP и NPP от aQ

$$GPP = \varepsilon_{GPP} \cdot aQ \quad NPP = \varepsilon_{NPP} \cdot aQ \quad , \quad (1)$$

где ε_{GPP} , ε_{NPP} определяют эффективность использования растениями ФАР для GPP и NPP , так и альтернативный подход, позволяющий описать нелинейный характер зависимости GPP и NPP от aQ :

$$GPP = (a_1 \cdot aQ) / (1 + b_1 \cdot aQ) \quad NPP = (a_2 \cdot aQ) / (1 + b_2 \cdot aQ) - R_a \quad . \quad (2)$$

Параметры a_1 и a_2 в (2) определяют углы наклона касательных к графикам функций в точках их пересечения с осями ординат ($aQ=0$) и эквивалентны величинам ε_{GPP} и ε_{NPP} в (1), а b_1 и b_2 характеризуют степень кривизны линий (2). При $b_1, b_2 \rightarrow 0$ нелинейные уравнения (2) превращаются в линейные (1). R_a в (2) - скорость автотрофного дыхания растений.

Анализ зависимости месячных и суточных сумм GPP и NPP от aQ для влажного тропического леса показывает, с одной стороны, хорошо прослеживающийся нелинейный характер зависимости GPP от aQ , а с другой стороны, близкую к линейной зависимость NPP от aQ (Рис. 6) (Ibrom et al., 2008). Для елового спелого леса Золлинга отмечается близкая к линейной зависимость GPP и NPP от aQ как для среднемесячных, так и для среднесуточных значений.

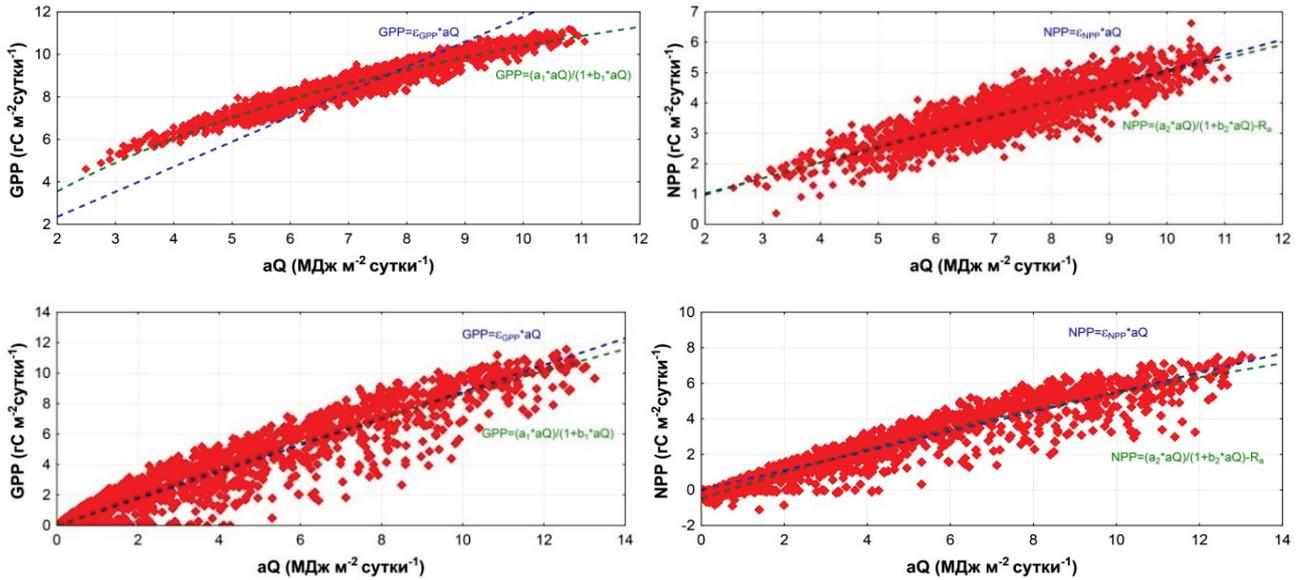


Рис. 6. Зависимость дневных сумм GPP и NPP от поглощенной ФАР (aQ) для влажного тропического леса в Барири в Индонезии (вверху) и для елового спелого леса в Золлинге в Центральной Германии (внизу).

Значение ϵ_{GPP} для влажного тропического леса ($\epsilon_{GPP}=1.18$ гС МДж⁻¹) на 36% превосходит ϵ_{GPP} для елового леса в умеренных широтах ($\epsilon_{GPP}=0.88$ гС МДж⁻¹). Для ϵ_{NPP} прослеживается обратная тенденция - в случае елового леса значение ϵ_{NPP} на 8% выше, чем для влажного тропического леса ($\epsilon_{NPP}=0.55$ и 0.51 гС МДж⁻¹ - для елового и влажного тропического леса, соответственно).

Глава 6. Реконструкция динамики H₂O- и CO₂-обмена лесных экосистем умеренных широт в позднеледниковье и голоцене

В главе представлена методика, разработанная для реконструкции составляющих H₂O- и CO₂-обмена лесных экосистем ЕТР на протяжении позднеледниковья и голоцена (Olchev, Novenko, 2011; Ольчев, Новенко, 2012). Методика основана на комплексе регрессионных моделей, построенных с применением результатов численных экспериментов, проведенных с помощью Mixfor-SVAT модели для древостоев с различным видовым составом и для климатических сценариев, имитирующих различный температурный режим и условия увлажнения исследуемой территории.

С помощью предложенных регрессионных моделей и существующих реконструкций растительности и климата позднеледниковья и голоцена для

центральной части ЕТР, были получены данные о временной изменчивости GPP , RE , NEE , E , E_P и E_T лесных экосистем на исследуемой территории в течение последних 12000 лет. На основе анализа соотношений E , E_P и количества осадков проанализированы условия увлажнения района исследований и оценена их связь с динамикой растительности (Новенко, Ольчев, 2014; Novenko, Olchev, 2015). Было показано, что минимальные значения E , E_P , GPP и RE приходились на стадиал поздний дриас, а их максимальные значения - на позднеатлантический термический максимум голоцена (Рис. 7).

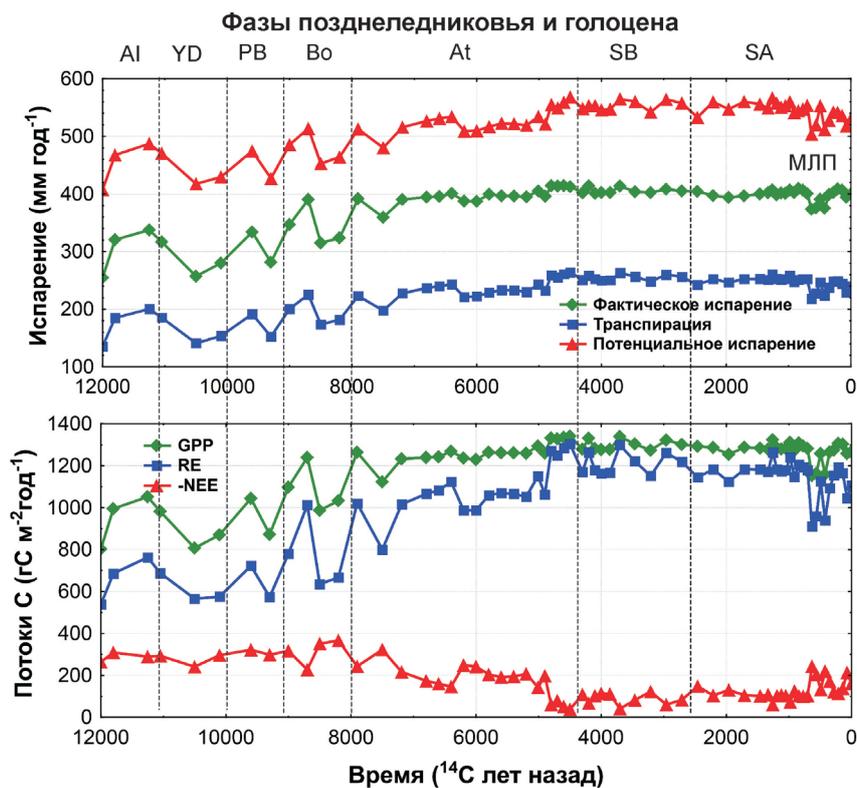


Рис. 7. Реконструкции изменения E , E_P и E_T (вверху) и GPP , RE и NEE (внизу), для южной части Валдайской возвышенности в позднеледниковье и голоцене. Фазы позднеледниковья и голоцена: AI - интерстадиал аллеред, YD – стадиал поздний дриас. Периоды голоцена: PB - пребореальный, Bo – бореальный, At – атлантический, SB – суббореальный, SA – субатлантический, МЛП – малый ледниковый период.

Глава 7. Изменение H_2O - и CO_2 -обмена лесных экосистем тропических и умеренных широт при изменении климата в XXI в.

В главе представлены результаты модельных исследований по оценке влияния климатических изменений на составляющие H_2O - и CO_2 -обмена лесных

экосистем влажных тропических и южнотаежных хвойных лесов ЕТР в XXI в.. При анализе использовались расчеты по глобальной модели ECHAM5 (Roeckner et al., 2003) для сбалансированного климатического сценария SRES A1B. Для прогноза возможных изменений составляющих H_2O - и CO_2 -обмена лесов при климатических изменениях использовалась Mixfor-SVAT модель.

Для учета в модельных расчетах возможной адаптации растений к прогнозируемому в XXI в. изменению климатических условий и росту содержания CO_2 в воздухе, в исследовании было рассмотрено несколько сценариев, предполагающих как сохранение современной структуры древостоев в будущем без изменений, так и возможное изменение биомассы деревьев под влиянием климатических факторов и роста CO_2 в воздухе. Также в расчетах учитывалось возможное снижение притока питательных веществ (азота, калия, фосфора) к растениям в силу нарушения баланса донорно-акцепторных связей, истощения запасов питательных веществ в почве, ослабления притока влаги к растениям, а также других факторов. Для лесов умеренных широт были рассмотрены сценарии, предусматривающие возможные изменения видового состава древостоев, и в частности, увеличение доли широколиственных и уменьшение доли хвойных пород деревьев в древостое (Olchev et al., 2009).

Результаты сравнения современных и проекции будущих климатических условий (сценарий SRES A1B) на территориях, занятых влажными тропическими лесами в экваториальных районах Индонезии и южнотаежными хвойными лесами в центре ЕТР, отмечают общую тенденцию к росту к концу XXI в. температуры воздуха, упругости водяного пара и количества осадков, а также к уменьшению приходящей суммарной солнечной радиации. Для лесов, произрастающих на хорошо дренированных почвах, на фоне изменения климатических условий и ожидаемого двукратного увеличения CO_2 в воздухе, прогнозируется уменьшение E и E_T , и существенное увеличение GPP и NEE при условии, если прогнозируемое увеличение температуры и CO_2 в атмосфере будет строго сбалансировано с ростом запасов элементов минерального питания (N, P, K) и воды в почве и в растениях (Табл. 1) (Ольчев с соавт., 2013).

Табл. 1. Относительное изменение NEE , GPP , NPP , RE , E и E_T при будущих (сценарий SRES A1B) климатических условиях по отношению к измеренным современным (*совр.*) значениям для влажного тропического леса в Индонезии и монодоминантного елового леса в подзоне южной тайги (%).

$\Delta NEE/NEE_{совр.}$	$\Delta GPP/GPP_{совр.}$	$\Delta NPP/NPP_{совр.}$	$\Delta RE/RE_{совр.}$	$\Delta E/E_{совр.}$	$\Delta E_T/E_{Tсовр.}$
Влажные тропические леса					
10.7	34.1	32.0	45.1	-14.3	-20.1
Еловые леса умеренных широт					
1.5	22.5	8.1	33.0	-4.0	-16.1

На фоне прогнозируемого роста температуры и изменения режима осадков к концу XXI в. на территориях, занятых влажными тропическими лесами в Индонезии, существенных изменений в структуре и видовом составе растительности при изменении климата не прогнозируется. На территориях занятых южнотаежными еловыми лесами на ЕТР, может произойти частичное замещение ели мелколиственными (береза, осина) и широколиственными (липа, дуб, вяз) породами деревьев (Ольчев с соавт., 2013; Новенко с соавт., 2014). Расчеты показали, что с учетом различий в скорости фотосинтеза, дыхания и E_T у лиственных и хвойных пород деревьев, а также изменения продолжительности их вегетационных периодов при потеплении климата, увеличение доли лиственных пород в древостое может привести к дополнительному увеличению GPP , NEE , E и E_T лесных экосистем (Рис. 8). При этом максимальное увеличение E прогнозируется при 60-70% замещении ели лиственными породами деревьев в древостое.

При рассмотрении влияния изменений климатических условий на составляющие H_2O - и CO_2 -обмена лесных экосистем с учетом возможного снижения притока питательных веществ к растениям, у древостоев отмечается общая тенденция к снижению скорости ассимиляции и E_T (Рис. 8-9). При этом уменьшение запасов питательных веществ в растениях даже на 20% может полностью скомпенсировать увеличение GPP древостоя, вызванное ростом скорости ассимиляции растений при прогнозируемом увеличении содержания CO_2 в воздухе и повышении температуры (Ольчев с соавт., 2013).

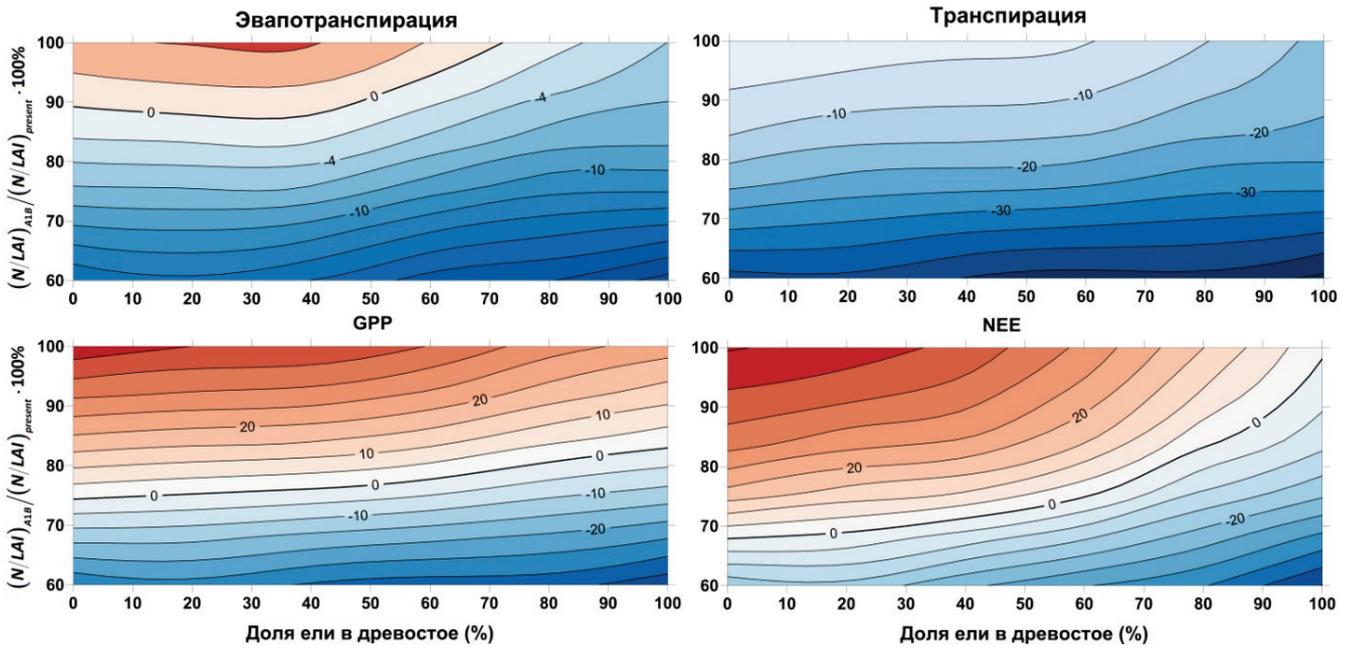


Рис. 8. Относительное изменение E , E_T , GPP и NEE еловых лесов южной тайги в процентах при климатических изменениях (сценарий SRES A1B) для различных вариантов изменения видового состава древостоя (соотношение ели и лиственных пород деревьев в древостое), а также процентных изменений количества доступного азота (N) в листьях растений.

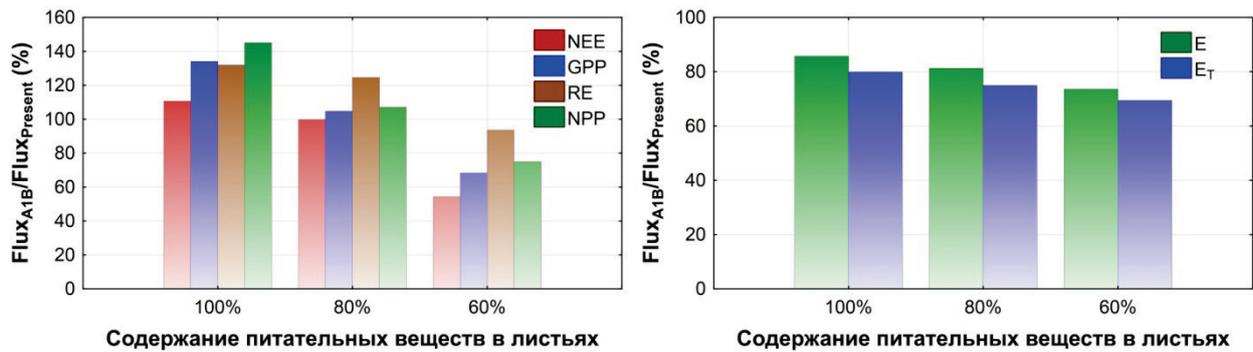


Рис. 9. Соотношение годовых сумм NEE , GPP , RE , NPP (слева), E и E_T (справа) влажного тропического леса в Индонезии (о. Сулавеси) при будущих ($Flux_{A1B}$) и современных ($Flux_{present}$) климатических условиях (сценарий SRES A1B) при разных сценариях снижения поступления питательных веществ к растениям. Изменение содержания питательных веществ в листьях растений рассчитывалось в % как отношение между содержанием питательных веществ на единицу листовой поверхности (LAI) при будущих ($A1B$) и современных ($present$) климатических условиях.

Глава 8. Влияние обезлесения и изменения структуры землепользования на H_2O - и CO_2 -обмен между подстилающей поверхностью и атмосферой в умеренных и тропических широтах

В главе показано применение математических моделей для оценки влияния процесса обезлесения и изменения структуры землепользования на потоки CO_2 и H_2O между земной поверхностью и атмосферой в локальном и региональном масштабах в условиях современного климата. Для этого были проведены количественные модельные оценки потоков CO_2 и H_2O на двух экспериментальных площадях: в елово-широколиственном лесу с небольшой сплошной вырубкой в Оттербахе в Центральной Германии и на участке влажного тропического леса в национальном парке Лоре-Линду в Индонезии.

Раздел 8.1 Влияние сплошной вырубки на радиационный режим и H_2O - и CO_2 -обмен лесной экосистемы с атмосферой в локальном масштабе

Для оценки влияния вырубки на радиационный режим, H_2O - и CO_2 -обмен между лесной экосистемой и атмосферой в исследовании была выбрана небольшая сплошная однолетняя вырубка площадью 2.6 га (около $160\text{м} \times 160\text{м}$), окруженная еловым (*Picea abies*) и широколиственным лесом (в юго-восточной части) с буком (*Fagus sylvatica*), дубом (*Quercus robur*) и кленом (*Acer platanoides*) (Рис. 10). Применение модели Mixfor-3D для расчета потоков на вырубке было обусловлено невозможностью описания режима радиации, и определения вертикальных потоков CO_2 и H_2O классическими прямыми методами измерений.

Данные расчетов показали, что в результате сплошной вырубки происходит существенные изменения пространственного распределения солнечной радиации, скоростей фотосинтеза и E_T древесного и травяного яруса растительности, турбулентного переноса CO_2 и H_2O внутри и над РП (Рис. 10). Эти изменения крайне неоднородны и существенно меняются в дневном ходе, в значительной степени определяясь погодными условиями (Olchev et al., 2009, Radler et al., 2010).

По результатам проведенных модельных расчетов было показано, что исследуемая однолетняя вырубка в летние месяцы, независимо от погодных условий, служила источником CO_2 для атмосферы. Потоки над окружающим еловым и широколиственным лесом в зависимости от погодных условий изменялись в пределах от -8.0 до $-3.0 \text{ гС м}^{-2} \text{ день}^{-1}$ при солнечной погоде и от 0.0

до $+4.0 \text{ гС м}^{-2} \text{ день}^{-1}$ - при пасмурной. Слабая зависимость потоков CO_2 над вырубкой от погодных условий была обусловлена определяющим вкладом в результирующий поток дыхания почвы и эмиссии CO_2 при деструкции древесных остатков, несмотря на наличие на вырубке участков с относительно плотным активно фотосинтезирующим травяным покровом.

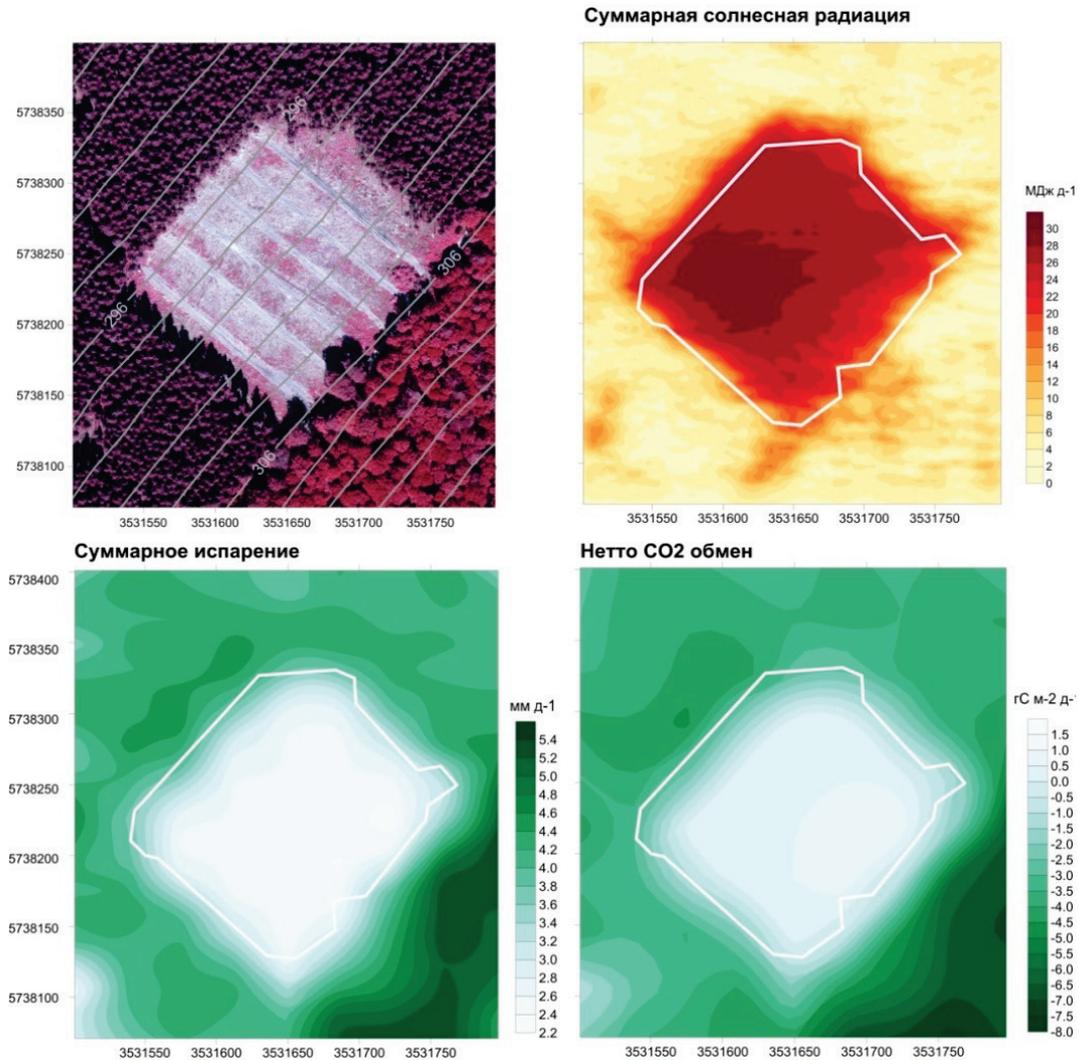


Рис. 10. Аэрофотоснимок участка елового и широколиственного дубово-букового леса со сплошной вырубкой вблизи Оттербаха в национальном парке Золлинг в Германии, и смоделированные поля суммарной солнечной радиации под пологом древесного яруса растительности, E и NEE над верхней границей растительности для дня с малооблачной погодой (28.06.2005).

Различия в E над вырубкой и над окружающим вырубку лесом были не столь существенными: E на вырубке при солнечной погоде была в среднем на 50% ниже E окружающего леса, изменяясь от 2.0 до 2.5 мм сут^{-1} . В пасмурные дни

суточные суммы E с поверхности вырубки были близки к суммам E окружающего вырубку древостоя.

Раздел 8.2. Влияние изменения структуры землепользования на H_2O - и CO_2 -обмен земной поверхности с атмосферой в региональном масштабе

Оценка влияния процессов обезлесения и изменения структуры землепользования на потоки CO_2 и H_2O между земной поверхностью и атмосферой в региональном масштабе была проведена для участка территории национального парка Лоре-Линду в Индонезии площадью 676 км^2 ($26 \text{ км} \times 26 \text{ км}$) (Рис. 11) с использованием региональной модели SVAT-Regio. Выбранный район расположен в северной части парка и включает как участки нетронутых влажного тропического леса, так и сельскохозяйственные поля, плантации кофе и какао, пастбища, населенные пункты и водные объекты. Современная структура землепользования исследуемой территории была восстановлена с использованием данных Landsat ETM+ и результатов их верификации на местности. Сценарий возможных будущих изменений структуры землепользования был разработан на основе анализа динамики скорости обезлесения в регионе начиная с 1990 г. по настоящее время и предусматривал постепенное снижение площадей занятых тропическими лесами за последующие 10-15 лет на 18% (с 75% до 61% общей площади) и их замещение сельскохозяйственными и урбанизированными территориями.

Для расчетов был выбран период, приходящийся на середину наименее влажного сезона года и характеризующийся минимальным количеством осадков и максимальными суммами приходящей солнечной радиации, что позволило более четко оценить пространственную неоднородность H_2O - и CO_2 -обмена, вызванную преимущественно видоспецифическими различиями произрастающих на исследуемой территории растительных сообществ. Сентябрь 2004 г. был выбран в качестве базового периода. Этот период был также интересен для рассмотрения в связи с началом активной фазы Эль-Ниньо.

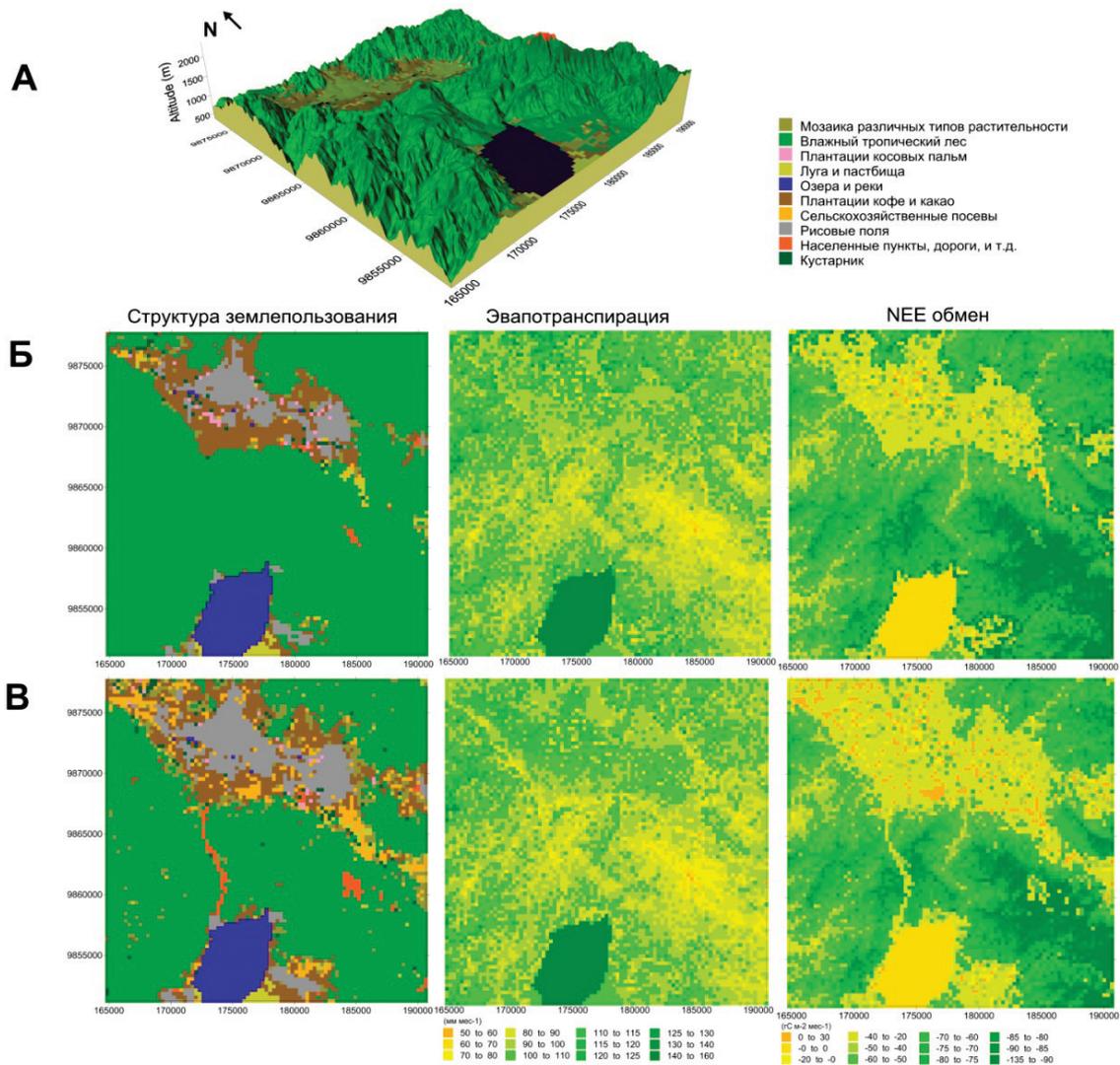


Рис. 11. Трехмерная модель рельефа района исследований в северной части национального парка Лоре-Линду в Центральном Сулавеси (А). Смоделированные месячные суммы E и NEE на исследуемой территории для сентября 2004 г. при современной структуре землепользования (Б) и для сценария, предусматривающего 18% снижение площади тропических лесов (В).

Результаты проведенных модельных расчетов E и NEE на исследуемой территории как для современной структуры землепользования, так и для сценария с обезлесением, отмечают значительную мозаичность полей E и NEE . Она обусловлена как неоднородностью поля солнечной радиации и температуры, так и различиями в LAI и структуре землепользования. Снижение на исследуемой территории площади тропических лесов на 18% при сохранении метеорологических условий сентября 2004 г. может привести, с одной стороны, к

незначительному снижению месячных сумм E на 2% (с 101.4 до 99.5 мм мес⁻¹), а с другой - к уменьшению NEE почти на 12% (с -58.7 до -51.8 гС м⁻² мес⁻¹).

Довольно слабое снижение E при значительном уменьшении площадей, занятых тропическими лесами, прогнозируется, несмотря на выявленные различия в соотношении E и E_p для разных типов растительности. В частности, в районах, занятых преимущественно сельскохозяйственными угодьями, соотношение E/E_p изменялось от 0.44 до 0.75, а для участков, покрытых тропическими лесами, от 0.65 до 0.95. Выявленные закономерности могут быть обусловлены оптимальными условиями почвенного увлажнения района исследований, за счет сохранения в течение всего года относительно высокого фона осадков (достигающего даже в наименее влажный сезон 120-130 мм мес⁻¹ на наветренных склонах гор), и сглаживающего существующие различия в скорости E и E_T у лесной и травянистой растительности.

Заключение и основные выводы

В ходе исследования, проведенного в рамках решения общей фундаментальной проблемы взаимодействия климата и растительности, решена новая научная проблема, а именно: на основе комплекса математических моделей и данных экспериментальных наблюдений определены и показаны масштабы временной изменчивости составляющих тепло-, H₂O- и CO₂-обмена хвойных лесов умеренных широт Европы и вечнозеленых влажных тропических лесов Индонезии при современных климатических условиях, а также выполнены реконструкции их динамики в прошлые эпохи и выявлены тенденции их изменений при прогнозируемых изменениях климата и структуры землепользования в XXI веке.

В ходе проведенных исследований были сделаны следующие основные выводы:

1. На основании результатов проверки адекватности разработанного комплекса процесс-ориентированных одномерных и трехмерных моделей, проведенных с применением данных полевых наблюдений, показано, что модели

адекватно описывают пространственно-временную изменчивость H_2O - и CO_2 -обмена, микроклиматические условия приземного слоя воздуха, температурный и влажностный режим почвы лесных и травянистых экосистем разного видового состава в широком диапазоне погодных условий и условий почвенного увлажнения.

2. Показана применимость авторских моделей для обеспечения непрерывности рядов измеренных первичных данных по потокам H_2O и CO_2 во влажном тропическом лесу Индонезии и в еловом лесу в центральной Германии. На основе анализа этих восстановленных рядов получены данные о межгодовой, сезонной и внутрисуточной изменчивости потоков в исследуемых лесных экосистемах. В том числе установлено, что в тропических лесах в течение года на испарение затрачивается от 70 до 76% величины радиационного баланса, в то время как в лесах умеренных широт эта величина при положительных значениях радиационного баланса изменяется от 100% весной и осенью до 50% в летнее время. При этом, среднегодовые доли затрат тепла на испарение в интегральном годовом радиационном балансе для исследованных влажных тропических и еловых лесов почти одинаковы - 74 и 75%, соответственно. В годовом цикле исследованные леса служили стоком CO_2 из атмосферы.

3. Показано, что аномальные изменения в режиме облачности и солнечной радиации в периоды кульминации ENSO оказывают определяющее воздействие на межгодовую изменчивость GPP и E влажных тропических лесов Индонезии в условиях среднегорья. Изменения в режиме температуры и осадков в активные фазы ENSO существенного влияния на CO_2 - и H_2O -обмен влажных тропических лесов не оказывают.

4. Для лесов умеренных широт выявлены существенные различия в отклике различных пород деревьев в разных условиях местообитания на аномально жаркие и засушливые погодные условия. Определяющими факторами являлись различия в продолжительности засушливого периода с высокой температурой и низкой влажностью воздуха, а также глубина корневой системы деревьев.

5. Выявлены различия в зависимости интегральных месячных и суточных сумм GPP от величины поглощенной РП ΦAP (aQ) для влажных тропических лесов Индонезии и еловых лесов умеренных широт. Если зависимость GPP от aQ для влажных тропических лесов Индонезии имеет четко выраженный нелинейный характер, то для еловых лесов умеренных широт она близка к линейной. Эффективность использования растениями ΦAP на GPP для влажного тропического леса ($\varepsilon_{GPP}=1.18$ гС МДж⁻¹) на 36% превосходит значения этого параметра для елового леса в умеренных широтах ($\varepsilon_{GPP}=0.88$ гС МДж⁻¹). Напротив, эффективность использования растениями ΦAP на NPP для елового леса на 8% выше, чем для влажного тропического леса ($\varepsilon_{NPP}=0.55$ и 0.51 гС МДж⁻¹ - для елового и влажного тропического леса, соответственно).

6. Получены количественные оценки возможных изменений режима солнечной радиации и потоков CO_2 и H_2O в еловом лесу, вызванных сплошной рубкой. Выявлена суточная динамика изменений и их зависимость от погодных условий. Выполнены оценки влияния изменения структуры землепользования на составляющие CO_2 - и H_2O -обмена между земной поверхностью и атмосферой на примере северной части национального парка Лоре Линду в Индонезии. Показано, что при условии сохранения современных климатических условий и содержания CO_2 в воздухе, сокращение площади лесов в регионе на 18% может привести к снижению среднемесячных значений NEE на 12%, а E лишь на 2%.

7. Восстановлена динамика составляющих CO_2 - и H_2O -обмена лесных экосистем центральных районов ЕТР за последние 12 тыс. лет. Выявлено, что минимальные значения E , E_p , GPP и RE приходились на стадиал поздний дриас, а их максимальные значения - на позднеатлантический термический максимум голоцена.

8. Спрогнозировано возможное влияние изменения климата и видового состава растительности к концу XXI в. на потоки CO_2 и H_2O в лесных экосистемах. Показано, что изменение климатических условий может привести к существенному увеличению GPP и NEE влажных тропических и еловых лесов умеренных широт на фоне незначительного уменьшения E при условии, если

прогнозируемое увеличение температуры и CO_2 в атмосфере будет строго сбалансировано с ростом запасов элементов минерального питания и воды в почве и в растениях. На фоне роста температуры и изменения режима осадков к концу XXI века в еловых лесах умеренных широтах может произойти частичное замещение ели в древостоях лиственными породами деревьев. Для территории, занятой влажными тропическими лесами в Индонезии, существенных изменений в структуре и видовом составе растительности при изменении климата не прогнозируется.

Таким образом, полученные в работе основные результаты показали возможность применения разработанных моделей для решения широкого спектра теоретических, методологических и прикладных экологических задач, лежащих в рамках общей фундаментальной научной проблемы взаимодействия климата и лесной растительности.

Список наиболее важных работ, в которых опубликованы основные положения диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. **Oltchev A.**, Ibrom A., Morgenstern K., Kreilein H., Gravenhorst G. Evaluation of the response of a spruce forest on climatic changes: results of modelling experiments // *Physics and Chemistry of the Earth*. - 1999. - 24(1-2). - P. 103-110
2. Janssens I.A., Lankreijer H., Matteucci G., Kowalski A.S., Buchmann N., Epron D., Pilegaard K., Kutsch W., Longdoz B., Grünwald T., Montagnani L., Dore S., Rebmann C., Moors E.J., Grelle A., Rannik Ü., Morgenstern K., **Oltchev A.**, Clement R., et al. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests // *Global Change Biology*. - 2001. - 7(3). - P. 269-279
3. **Oltchev A.**, Cermak J., Gurtz J., Kiely G., Nadezhdina N., Tishenko A, Zappa M, Lebedeva N, Vitvar T., Albertson J.D., Tatarinov F., Tishenko D., Nadezhdin V., Kozlov B., Ibrom A., Vygodskaya N., Gravenhorst G. The response of the water fluxes of the boreal forest region at the Volga's source area to climatic and land-use changes // *Physics and Chemistry of the Earth*. - 2002. - 27(9-10). - P. 675-690

4. **Oltchev A.**, Cermak J., Nadezhdina N., Tatarinov F., Tishenko A., Ibrom A., Gravenhorst G. Transpiration of a mixed forest stand: field measurements and simulation using SVAT models // *Boreal Environmental Research*. - 2002. - 7(4). - P. 389-397
5. **Ольчев А.В.** Концепция модели испарения для неоднородных лесных ландшафтов // *Лесоведение*. - 2003. - №2. - С. 55-64
6. Falge E., Reth S., Brüggemann N, Butterbach-Bahl K., Goldberg V., **Oltchev A.**, Schaaf S., Spindler G., Stiller B., Queck R., Köstner B., Bernhofer C. Comparison of surface energy exchange models with eddy flux data in forest and grassland ecosystems of Germany // *Ecological Modelling*. - 2005. - 188(2-4). - P. 174-216
7. Falk U., Ibrom A., Kreilein H., **Oltchev A.**, Gravenhorst G. Energy and water fluxes above a cacao agroforestry system in Central Sulawesi, Indonesia, indicate effects of land-use change on local climate // *Meteorologische Zeitschrift*. - 2005. - 14(2). - P. 219-225
8. Gravenhorst G., **Oltchev A.**, Sogachev A., Ibrom A., Kreilein H. Forests as protection against airborne immissions // *Meteorologische Zeitschrift*. - 2005. - 14(2). - P. 117-122
9. Tatarinov F., Bochkarev Y., **Oltchev A.**, Nadezhdina N., Cermak, J. Effect of contrasting water supply on the diameter growth of Norway spruce and aspen in mixed stands: a case study from the southern Russian taiga // *Annals of Forest Science*. - 2005. - 62. - P. 807–816
10. Ibrom A., Jarvis P.G., Clement R., Morgenstern K., **Oltchev A.**, Medlyn B.E., Wang Y.P., Wingate L., Moncrieff J.B., Gravenhorst G. A comparative analysis of simulated and observed photosynthetic CO₂ uptake in two coniferous forest canopies // *Tree Physiology*. - 2006. - 26. - P. 845-864
11. Leemhuis C., Erasmi S., Twele A., Kreilein H., **Oltchev A.**, Gerold G. Rainforest Conversion in Central Sulawesi, Indonesia - Recent Development and Consequences for River Discharge and Water Resources // *Erdkunde*. - 2007. - 61(3). - P. 252-264
12. **Olchev A.**, Ibrom A., Ross T., Falk U., Rakkibu G., Radler K., Grote S., Kreilein H., Gravenhorst G. A modelling approach for simulation of water and carbon dioxide exchange between multi-species tropical rain forest and the atmosphere // *Ecological Modelling*. - 2008. - 212. - P. 122-130
13. **Olchev A.**, Ibrom A., Priess J., Erasmi S., Leemhuis C., Twele A., Radler K., Kreilein H., Panferov O., Gravenhorst G. Effects of land use changes on evapotranspiration of tropical

- rain forest margin area in Central Sulawesi (Indonesia): modelling study with a regional SVAT model // *Ecological Modelling*. - 2008. - 212. - P. 131-137
14. Ibrom A., **Olchev A.**, June T., Kreilein H., Rakkibu G., Ross Th., Panferov O., Gravenhorst G. Variation in photosynthetic light-use efficiency in a mountainous tropical rain forest in Indonesia // *Tree Physiology*. - 2008. - 28(4). - P. 499-508
15. **Ольчев А.В.**, Курбатова Ю.А., Варлагин А.В., Выгодская Н.Н. Модельный подход для описания переноса CO₂ между лесными экосистемами и атмосферой // *Лесоведение*. - 2008. - №3. - С. 3-13
16. **Olchev A.**, Radler K., Sogachev A., Panferov O., Gravenhorst G. Application of a three-dimensional model for assessing effects of small clear-cuttings on radiation and soil temperature // *Ecological Modelling*. - 2009. - 220. - P. 3046–3056
17. **Ольчев А.В.**, Курбатова Ю.А., Татаринов Ф.А., Молчанов А.Г., Варлагин А.В., Горшкова И.И., Выгодская Н.Н. Оценка первичной валовой и чистой продуктивности еловых лесов Центрально-Европейской части России с помощью полевых измерений и математической модели // *Успехи современной биологии*. - 2009. - №6. - С. 565-577
18. Выгодская Н.Н., Варлагин А. В., Курбатова Ю. А., **Ольчев А. В.**, Панферов О. И., Татаринов Ф. А., Шалухина Н. В. Реакция таежных экосистем на экстремальные погодные условиям и климатические аномалии // *Доклады Академии Наук*. - 2009. - Т.429(6). - С. 842-845
19. **Olchev A.**, Novenko E., Desherevskaya O., Krasnorutskaya K., Kurbatova J. Effects of climatic changes on carbon dioxide and water vapor fluxes in boreal forest ecosystems of European part of Russia // *Environmental Research Letters* - 2009. - 4(4). - P. 045007
20. 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 // *Environmental Research Letters* - 2009. - 4(4). - P. 045016
21. Татаринов Ф.А., Молчанов А.Г., **Ольчев А.В.** Оценка и минимизация ошибок при измерении дыхания почвы по открытой схеме // *Известия Самарского научного центра РАН*. - 2009. - Т.11. - №1(7). - С. 1592-1595
22. **Ольчев А.В.**, Радлер К. Применение трехмерной модели для описания влияния вырубки на радиационный режим лесной экосистемы // *Известия Самарского научного центра РАН*. - 2009. - Т.11. - №1(7). - С. 1538-1542

23. Widlowski J-L., Pinty B., Clerici M., Dai Y., De Kauwe M., de Ridder K., Kallel A., Kobayashi H., Lavergne T., Ni-Meister W., **Olchev A.**, Quaife T., Wang S., Yang W., Yang Y., Yuan H. RAMI4PILPS: An Intercomparison of Formulations for the Partitioning of Solar Radiation in Land Surface Models // *Geophysical Research*. - 2011. - 116. - P. G02019
24. **Olchev A.**, Novenko E. Estimation of potential and actual evapotranspiration of boreal forest ecosystems in the European part of Russia during the Holocene // *Environmental Research Letters*. - 2011. - 6(4). - P. 045213
25. Придача В. Б., Сазонова Т.А., Таланова Т.Ю., **Ольчев А.В.** Морфофизиологическая реакция *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Lebed. при техногенном воздействии в условиях Северо-Запада России // *Экология*. - 2011. - № 1. - С. 25-33
26. **Ольчев А.В.**, Новенко Е.Ю. Испарение лесных экосистем центральных районов Европейской территории России в голоцене // *Математическая биология и биоинформатика*. - 2012. - Т. 7(1). - С. 284-298
27. **Ольчев А.В.**, Волкова Е.М., Каратаева Т., Новенко Е.Ю. Нетто CO₂-обмен и испарение сфагнового болота в зоне широколиственных лесов Европейской России // *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки*. - 2012. - №3. - С. 207-220
28. **Ольчев А.В.**, Дещеревская О.А., Курбатова Ю.А., Молчанов А.Г., Новенко Е.Ю., Придача В.Б., Сазонова Т.А. CO₂ и H₂O обмен в лесных экосистемах южной тайги при климатических изменениях // *Доклады Академии Наук*. - 2013. - №450(6). - С. 731–735
29. Bunn A.G. Hughes M.K., Kirilyanov A.V., Losleben M., Shishov V.V., Berner L.T., **Olchev A.**, Vaganov E.A. Comparing forest measurements from tree rings and a space-based index of vegetation activity in Siberia // *Environmental Research Letters*. - 2013. - 8. - P. 035034
30. **Olchev A.**, Volkova E., Karataeva T., Novenko E. Growing season variability of net ecosystem CO₂ exchange and evapotranspiration of a sphagnum mire in the broad-leaved forest zone of European Russia // *Environmental Research Letters*. - 2013. - 8. - P.035051
31. Новенко Е.Ю., Зюганова И.С., **Ольчев А.В.** Применение метода палеоаналогов для прогноза динамики растительности при изменениях климата // *Доклады Академии Наук*. - 2014. - №457(1). - С.117-121

32. Мухартова Ю.В., Левашова Н.Т., **Ольчев А.В.**, Шапкина Н.Е. Применение двумерной модели для описания турбулентного переноса CO₂ в пространственно-неоднородном растительном покрове // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика и Астрономия. - 2015. - № 1. - С. 15-22
33. Novenko E.Yu., **Olchev A.V.** Early Holocene vegetation and climate dynamics in the central part of the East European Plain (Russia) // Quaternary International. -2015.- doi:10.1016/j.quaint.2015.01.027
34. Левашова Н.Т., Мухартова Ю.В., Давыдова М.А., Шапкина Н.Е., **Ольчев А.В.** Применение теории контрастных структур для описания поля скорости ветра в пространственно-неоднородном растительном покрове // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика и Астрономия. - 2015. - № 3. - С. 3-10

Главы в монографиях

- Bernhofer Ch., Köstner B., Arnold K., Atashfaraz S., Bange J., Baums A.-B., Berger H., Beyrich F., Butterbach-Bahl K., Brüggemann E., Brüggemann N., Dämmgen U., Falge E., Feigenwinter Ch., Fischer B., Foken Th., Göckede M., Goldberg V., Gravenhorst G., Grüner A., Grünhage L., Grünwald T., Haggagy M., Herrmann H., Herold M., Imbery F., Ibrom A., Kesik M., Letzel M.O., Li Ch. Liebenthal C., Lohse A., Matschullat J., Matzarakis A., Mauder M., Mayer H., Miehle A., **Oltchev A.**, Pleßow K. et al. Vertical Transport of Energy and Trace Gases at Anchor Stations and Their Spatial and Temporal Extrapolation under Complex Natural Conditions / In: The AFO 2000 Synthesis. - Ed. R. Winkler. - Weikersheim: Margraf Publishers GmbH, 2005. - P. 68-90
- Ibrom A., **Olchev A.**, June T., Ross T., Kreilein H., Falk U., Merklein J., Twele A., Rakkibu G., Grote S., Rauf A., Gravenhorst G. Effects of land-use change on matter and energy exchange between ecosystems in the rain forest margin and the atmosphere. In: The stability of tropical rainforest margins: Linking ecological, economic and social constraints / Eds. T. Tschardtke, C. Leuschner, M. Zeller, E. Guhardja, A. Bidin. - Berlin: Springer Verlag, 2007. - P. 463-492
- Olchev A.** Coupled modeling water vapor and carbon dioxide fluxes in the soil-vegetation-atmosphere system / In: Encyclopedia of Life Support Systems. Hydrological System Modelling. - V. 2. - Eds. L.S. Kuchment, V.P.Singh. - UK: EOLSS Publisher, 2009. - E2-26-18. - P. 70-105

4. Инсаров Г.Э., Борисова О.К., Корзухин М.Д., Кудяров В.Н, Минин А.А., **Ольчев А.В.**, Семенов С.М., Сирин А.А., Харук В.И. Природные экосистемы суши, Глава 6 / В: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. - под ред. С.М. Семенова. Москва: НИЦ «Планета», 2012. - С. 190-265

Другие публикации

1. Bolondinsky V., **Oltchev A.**, Jin H.O, Joo Y.T., Chung D.J. Experimental study of the short-term fluctuations of net photosynthesis rate of Norway spruce needles under field conditions // Journal of Korean Forest Society. - 1999. - 88(1). - P. 38-46
2. Morgenstern K., Falk M., **Oltchev A.**, Ibrom A., Gravenhorst G. Charakterisierung der turbulenten Diffusion im Stammraum eines Fichtenbestandes // Annalen der Meteorologie. - 1999. - 39. - S. 56-58
3. Panferov O., Ibrom I., Kreilein H., **Oltchev A.**, Rauf A., June T., Gravenhorst G., Knohl A. Between deforestation and climate impact: the Bariri Flux tower site in the primary montane rainforest of Central Sulawesi, Indonesia // The Newsletter of FLUXNET. - 2009. - 2(3). - P. 17-19
4. Desherevskaya O., Kurbatova J., **Olchev A.** Climatic conditions of the south part of Valday Hills, Russia, and their projected changes during the 21st century // Open Geography Journal. - 2010. - 3. - P. 73-79
5. Radler K., **Oltchev A.**, Panferov O., Klinck U., Gravenhorst G. 2010 Radiation and temperature responses to a small clear-cut in a spruce forest // Open Geography Journal. - 2010. - 3. - P. 103-114
6. **Olchev A.**, Gravenhorst G. Effects of climate changes on net ecosystem exchange of CO₂ and evapotranspiration of a tropical rain forest // Geographical Review of Japan Series B. - 87(2). - P. 122–130

и др.