

На правах рукописи



Рубцов Алексей Васильевич

АНАЛИЗ ПОЖАРОВ В СИБИРИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ И
РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ПОЖАРОВ В МОДЕЛИ ДИНАМИКИ
РАСТИТЕЛЬНОСТИ

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН.

Научный руководитель: академик РАН, доктор биологических наук
Ваганов Евгений Александрович

Научный консультант: PhD, профессор
Сие Филипп (Франция)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Доррер Георгий Алексеевич

кандидат физико-математических наук, доцент
Пестунов Игорь Алексеевич

Ведущая организация: Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН
г. Томск

Защита состоится «27» мая 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ДМ212.099.05 при Сибирском федеральном университете по адресу:
г. Красноярск, ул. академика Киренского, 26, аудитория УЛК 115

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета.

Автореферат разослан 25 апреля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Непомнящий О.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертационного исследования

Сибирские леса особо чувствительны к разрушающему воздействию пожаров, результатом которых является увеличение содержания аэрозолей и парниковых газов в атмосфере, изменения в радиационном балансе территории, а также балансе углерода и составе растительности. Возникновение и интенсивность развития лесного пожара зависят от климатических условий, в частности, от погодных аномалий, естественных факторов возгорания и от человеческого фактора, способности лесоохранных служб своевременно выявлять и тушить обнаруженные пожары. Прогнозы и тенденции изменения климата порождают необходимость развития двух важнейших направлений: 1) модернизация моделей оперативного прогнозирования возникновения и развития пожаров для планирования противопожарных мероприятий; 2) усовершенствование методов учета текущих и будущих эмиссий газов в результате пожаров, позволяющих оценить их вклад в глобальное изменение климата.

Современная реализация сетевого мониторинга пожаров использует методы обработки спутниковых данных для обнаружения активных пожаров и площадей гарей. Примером является Центр глобального мониторинга пожаров (GFMC), в России существует Информационная система дистанционного мониторинга пожаров (ИСДМ-Рослесхоз). Спутниковые данные имеют достаточное пространственное разрешение и высокую частоту обновления для точного определения пространственно–временных особенностей пожаров на больших территориях. Прогнозирование развития пожароопасной ситуации осуществляется по индексам погодной пожарной опасности (ППО) на основе метеоданных. Низкая точность прогноза поведения лесных пожаров подтверждает необходимость усовершенствования используемых методов. Тестирование индексов ППО на соответствие параметрам детектируемых пожаров является первостепенной задачей в мониторинге пожаров на региональном уровне.

Второе направление особенно актуально для крупномасштабного анализа влияния пожаров на экосистемы, в его рамках решается задача их моделирования. Понимание причинных связей между климатической изменчивостью и возникновением пожаров необходимо для развития и применения биогеохимических моделей с целью прогнозирования динамики парниковых газов в атмосфере. В политико-экономическом аспекте это стимулирует усилия современного общества к уменьшению объёмов эмиссий CO_2 путём усовершенствования технологий производства, перехода на экологически чистые энергоносители и улучшения качества управления лесными территориями. Модели динамики растительности, такие как ORCHIDEE, рассчитывают содержание углерода в экосистемах Земли, и нерешенной задачей остается разработка методов оценки пожарной эмиссии в ORCHIDEE.

Целью диссертационной работы является тестирование и параметризация индексов погодной пожарной опасности (ППО) и разработка модуля пожаров в глобальной модели динамики растительности ORCHIDEE.

Основные задачи исследования:

- 1) выявление специфики и характерных особенностей пространственно–временного распределения пожаров в Сибири по спутниковым данным (AVHRR и MODIS) с привлечением информации о составе растительности;
- 2) тестирование моделей ППО по спутниковым данным о пожарах;
- 3) оценка методов параметризации моделей ППО с целью учета особенностей протекания пожаров в различных типах растительности, а также оценки функции погодного пожарного риска;
- 4) разработка, реализация и тестирование модуля пожаров в модели ORCHIDEE;
- 5) оценка среднегодовой эмиссии углерода в атмосферу при пожарах по расчетам модуля пожаров в модели ORCHIDEE;
- 6) оценка воздействия пожаров на динамику продуктивности различных типов растительности в модели ORCHIDEE.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Научно обоснованная территориальная специфика применения российских и канадских индексов погодной пожарной опасности в Сибири при прогнозировании динамики площадей пожаров по данным сети метеостанций и пространственно - интерполированным климатическим данным.
- 2) Алгоритм расчета пространственно неоднородной пожарной опасности в модели процесса возникновения и распространения пожаров модернизирован и адаптирован к территории Сибири с использованием спутниковых данных о пожарах и о составе растительности.
- 3) Модуль пожаров в биогеохимической модели ORCHIDEE, разработанный с помощью эмпирической модели процесса возникновения и распространения пожара, позволяет количественно оценивать роль пожаров в кругообороте углерода и динамике наземных растительных экосистем.

Методы исследования:

Решение поставленных задач основано на применении методов расчета и нормализации ППО, методов анализа спутниковых и климатических данных, методов моделирования пожаров в экосистемах и оценки эмиссии углерода. Математическая статистика использована в тестировании полученных результатов. Информационная база исследования включает данные о пожарах со спутников NOAA (прибор AVHRR), Terra (прибор MODIS), климатическую базу по сети метеостанций NCDC, оперативные пространственно–интерполированные климатические данные ECMWF, классификацию растительности GLC2000, спутниковые данные о снеговом покрове (прибор MODIS).

Обоснованность научных положений и выводов обеспечена использованием современного программного обеспечения при обработке многомерных массивов данных, стандартных статистических методов в анализе данных, сравнительного анализа полученных результатов с данными из литературных источников.

Научная новизна заключается в следующем:

1) С помощью анализа спутниковых данных определены характеристики территориального распределения пожаров в основных типах растительности, дополняющие известные данные статистики авиапатрулирования. Выявлена динамика параметра фактической горимости (ФГ) на территории исследования.

2) Впервые проведено тестирование российских и канадских индексов ППО на соответствие параметрам пожаров, полученных по ежедневным данным спутниковых приборов AVHRR и MODIS, на периоде исследования с 1996 по 2008 гг., что позволило оценить точность индексов ППО в аспекте прогнозирования площадей пожаров.

3) Предложены методы линейной и нелинейной нормализации индексов ППО, которые в отличие от стандартных методов позволяют производить оценку уровня риска возникновения пожаров дифференцированно по различным типам растительности.

4) Разработан новый алгоритм в модуле пожаров в биогеохимической модели ORCHIDEE, который интегрирует компоненты модифицированных систем прогноза возникновения пожаров, прогноза параметров распространения пожаров и схему расчета эмиссии от пожаров. Данная интеграция позволила перейти от ежегодных оценок моделируемых площадей пожаров и эмиссии углерода к ежедневным, а также повысить их точность по сравнению с предыдущей версией модуля пожаров.

Практическая значимость работы:

1) Разработанные методы нормализации и интерпретации ППО могут быть использованы в оперативном мониторинге пожаров и для долголетних оценок пожарной опасности и потенциального ущерба от пожаров.

2) Модуль пожаров в моделях динамики растительности является одним из методов оценки текущего состояния и прогнозирования сценариев изменения содержания парниковых газов в атмосфере с учетом антропогенных и природных эмиссий [IPCC, 2007], в состав которых входит и эмиссия от пожаров.

Апробация результатов исследования. Результаты работы докладывались на конференциях, научных школах и семинарах, в частности:

1) на международной конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES-2009» (г. Красноярск, 2009 г.);

2) на международном семинаре по проблемам изменения климата и окружающей среды (г. Красноярск, 2009 г.);

3) на XIII конференции молодых ученых КНЦ СО РАН (г. Красноярск, 2010 г.);

4) на конференции «Исследование компонентов лесных экосистем Сибири» (г. Красноярск, 2010 г.);

5) на Четвертой международной интернет – конференции «Леса России в XXI веке» (г. Санкт-Петербург, 2010 г.);

6) на III Всероссийской научно-практической конференции «Научное творчество XXI века» (г. Красноярск, 2010);

7) на семинарах Лаборатории научных исследований климата и окружающей среды (Франция, 2008 г.);

8) на семинарах лабораторий мониторинга леса и структуры древесных колец Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН.

Публикации: По теме диссертации опубликованы 7 печатных работ, из них 2 - в российских рецензируемых журналах, включенных в список ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и 4-х приложений. Содержание диссертации изложено на 158 страницах, включая 10 таблиц и 50 рисунков. Список литературы содержит 167 наименований.

Личный вклад автора. Автором выполнены все этапы исследования, разработаны программы обработки и анализа данных, выполнены необходимые расчеты, анализ и интерпретация результатов.

Благодарности

Автор диссертации благодарит академика РАН, д.б.н. Е.А. Ваганова и проф. Ф. Сие за руководство работой, а также к.ф.-м.н. А.И. Сухинина, Ф.М. Бреона и С.В. Веневского за сотрудничество в исследовательской работе. Проведение диссертационного исследования поддержано грантами РФФИ и программой стипендий французского правительства для диссертаций с совместным научным руководством. Часть результатов диссертации получены на основе методической базы и вычислительных ресурсов Лаборатории научных исследований климата и окружающей среды (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement) при Национальном центре научных исследований (CNRS, Франция).

ГЛАВА 1. МОНИТОРИНГ ПОЖАРОВ: ОТ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ДО МОДЕЛЬНОГО РАСЧЕТА

В главе кратко изложена информация о влиянии пожаров на экосистемы Сибири, связи изменения климата с динамикой пожаров, методах мониторинга активных пожаров (авиапатрулирование и обработка спутниковых данных) и пожарной опасности (обзор индексов ППО). Описаны существующие подходы в моделировании пожаров, обозначена их роль в составе моделей динамики растительности и влияние пожаров на кругооборот углерода.

ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО – ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЖАРОВ В СИБИРИ, ВЫЯВЛЕННЫХ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Алгоритм обнаружения пожаров по данным спектрорадиометров AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer, спутники NOAA) основан на превышении температуры излучения пламени пожара заданных пороговых значений (температуры фона) [Sukhinin et al., 2004]. Суточной площадью пожара является размер полигона, в котором на момент пролёта спутника пожар находился в стадии активного горения («активные пожары»). Итоговые площади пожаров рассчитываются за время протекания пожара с момента первого обнаружения до их полного тушения. Дополнительно использованы данные о пожарах с прибора MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, спутник EOS-Terra) [Justice et al., 2006]. Данные по AVHRR рассматриваются за период 1996-2008 гг. и по MODIS за 2001 – 2007 гг.

Состав растительности анализировался по классификации Global Land Classification (GLC2000) [Bartholomé et al., 2002], созданной в Joint Research Centre по данным прибора Vegetation (спутник SPOT4). 27 типов растительности из фрагмента данных GLC2000 для северо-евроазиатской территории [Bartalev et al., 2003] были перегруппированы в 11 типов методом их генерализации.

Ежегодная *статистика пожаров* по количеству и суммарной площади на территории исследования (рис. 1) демонстрирует тренд увеличения ежегодного количества и площадей пожаров. Из анализа всей базы данных пожаров были получены следующие значения индивидуальных пожаров: максимальная итоговая площадь (S_{max}) 2.4 млн. га, средняя арифметическая итоговая площадь (S_{mean}) около 800 га, максимальная площадь за день (S_{max}^{day}) более 200 тыс. га, среднее значение прироста площади за день (S_{mean}^{day}) около 600 га.

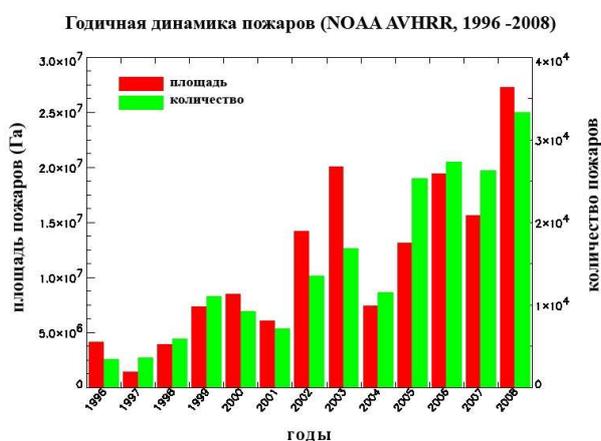


Рис. 1. Динамика суммарных площадей и количества пожаров по годам (1996 - 2008 гг.) для территории исследования

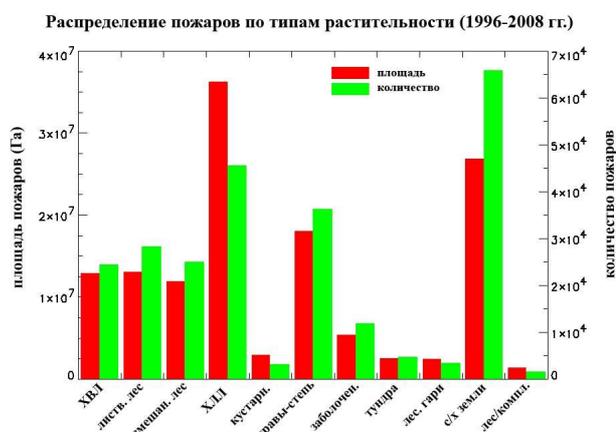


Рис. 2. Распределение площадей пожаров и их количества по типам растительности. Сокращения: ХВЛ – хвойный вечнозелёный лес, ХЛЛ – хвойный листопадный лес

Состав растительности в контуре пожара во многих случаях многокомпонентный. Помимо лесной растительности большое количество пожаров (в южной полосе Сибири) возникает на сельскохозяйственных (с/х) площадях и в травянистых типах растительности (рис. 2). Данная оценка является приблизительной, т.к. GLC2000 составлена по состоянию на 2000 г. и изменчивость покрова не учитывалась. Средняя итоговая площадь (S_{mean}^{Total}) для большинства типов варьируется в интервале от 250 до 420 га, для хвойных листопадных - 848 га с максимальной итоговой площадью пожара $S_{max}^{Total} = 1250$ тыс. га (табл. 1). Средняя площадь за день (S_{mean}^{day}) меньше S_{mean}^{Total} на ~20-30 %. Это значит, что пожар проходит основную часть площади за один день и далее развивается на той же территории.

Таблица 1. Статистика площадей пожаров по типам растительности

| | Хвойный вечнозелёный лес | Листоветный лес | Смешанный лес | Хвойный листопадный лес | Кустарники | Степи и луга | Заболоченные территории | Тундра | с/х и комплексы | Леса в комплексах |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------|---------------|-------------------------|------------|--------------|-------------------------|--------|-----------------|-------------------|
| S_{max}^{Total} (тыс. га) | 206.8 | 57.0 | 60.9 | 1250.3 | 46.8 | 188.6 | 41.6 | 159 | 172.5 | 23.1 |
| S_{mean}^{Total} (га) | 414 | 348 | 322 | 848 | 298 | 367 | 248 | 400 | 354 | 130 |
| S_{max}^{day} (тыс. га) | 30.9 | 19.5 | 40.7 | 165.4 | 9.4 | 29.5 | 11.4 | 11.3 | 23.5 | 11.6 |
| S_{mean}^{day} (га) | 315 | 297 | 268 | 549 | 248 | 311 | 194 | 292 | 308 | 144 |

Параметр «фактическая горимость» (ФГ) – это совокупность частоты возникновения и пространственных размеров возникших пожаров на территории. Карты суммарных площадей пожаров (СПП, S_{fire}^{all}) и суммарного количества пожаров (СКП, N_{fire}^{all}) были построены на градусной сетке $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ для каждого отдельного года, за все годы (1996-2008 гг.) в совокупности и с выборкой по отдельному месяцу. S_{fire}^{all} за 13 лет учитывает повторяемость пожаров в каждой ячейке карты, но при этом распределение S_{fire}^{all} непропорционально N_{fire}^{all} . Высокие значения S_{fire}^{all} могут происходить как от неоднократно повторяющихся пожаров с небольшими площадями, так и от единичных крупноразмерных пожаров. В связи с этой многофакторностью составлена классификация территории Сибири по степени ФГ методом кластерного анализа, объектами в котором являются пиксели этих карт с наличием пожаров. Полученные пять классов (рис. 3) ассоциированы с пятью уровнями ФГ от низкой до экстремальной. С повышением класса ФГ пропорционально увеличивается N_{fire}^{all} и S_{fire}^{all} . К классу сверхвысокой и экстремальной ФГ относится 2 % территорий, пройденных пожарами, к высокой ФГ – 9 %, к средней – 19 % и 70 % - к низкой ФГ.

Зоны сверхвысокой и экстремальной ФГ (в Забайкальском крае и прилегающей части Республики Бурятия, а также в Амурской области) преобладают на тех территориях, где пожарные события крупного масштаба накладываются на высокую частоту пожаров. К высокой и сверхвысокой ФГ относятся территории в центре

Новосибирской области, на юге Иркутской области и в центральной части Якутии. Средней ФГ характеризуются юго-западные области Сибири, а также Республика Хакасия, юг Республики Бурятия, частично Красноярский край и юг Хабаровского края. Распространение пожаров в горных массивах лимитируется отсутствием древесной растительности в верхних поясах, и поэтому территории на высотах 2500 – 3000 м характеризуются низкой и средней ФГ.

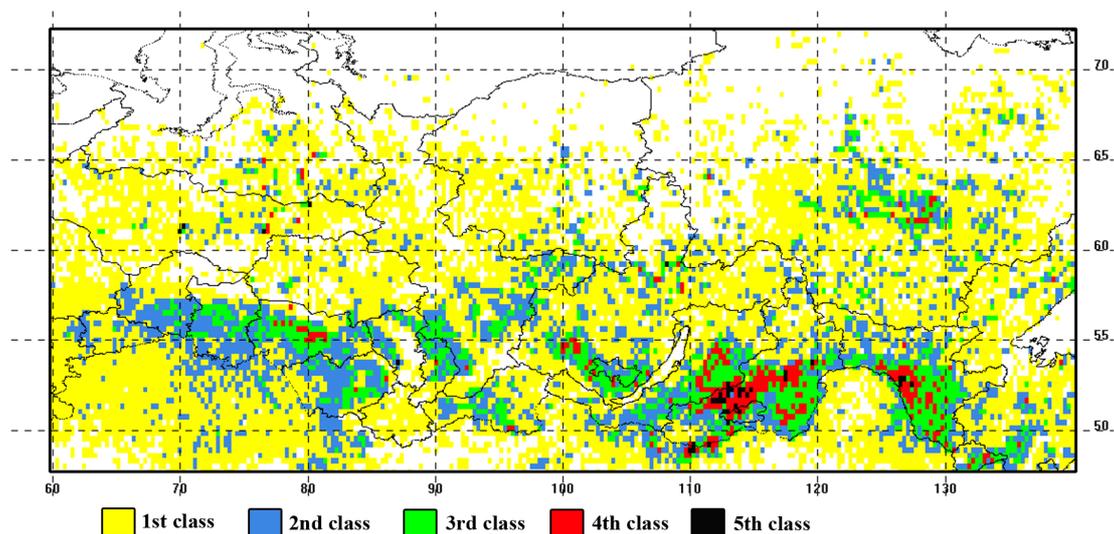


Рис. 3. Карта классов фактической горимости

Приведенная выше информация отличается от таковой для периода с 1965 по 1978 гг. [Sofronov, 1996]. Обширная зона экстремального класса ФГ тогда находилась преимущественно в Якутии, сверхвысокий класс ФГ затрагивал юго-западные области Сибири, Иркутскую область, южные районы Красноярского края, Хабаровский край. Частичное территориальное перераспределение зон повышенной ФГ может быть вызвано изменениями климата, отражающими связь пожаров с климатом и динамикой растительности.

Сезонность пожаров. Весенние пожары (март-апрель-май) действуют преимущественно во всей южной полосе Сибири. В июле и августе активность пожаров смещается на северные территории (Якутия, центральная часть Красноярского края, север Иркутской области и Хабаровский край). В сентябре и октябре второй пик пожаров отмечается на юге Забайкальского края, в Амурской области и в Хабаровском крае, также частично в Тюменской, Омской, Новосибирской областях и в Казахстане.

Анализ продолжительности пожаров. Основное количество пожаров (85.6 %) имеет временную протяженность в один день. Это характерно для 43.2 % площадей пожаров от общей их суммы. Еще 4.2 % пожаров (или 7.1 % площадей) действуют два дня, и остальное количество (10.2 %) равномерно уменьшается с увеличением длительности. Среднее значение длительности пожара – 1.87 дней, максимальное

значение – более 100 дней. Пожары с длительностью более 12 дней составляют 2 % от общего количества, однако они распространяются на большие территории (1/4 от СПП). Максимальные значения площадей пожаров в основном интервале от 1 до 90 дней варьируются от 100 тыс. га до 400 тыс. га, на остальной части интервала (>90 дней) находятся катастрофические пожары 2002 г. (1.2 млн. га, 0.6 млн. га) и 2003 г. (2.4 млн. га).

Антропогенный фактор пожаров. Преобладающее количество пожаров по пространственной удаленности от ближайших населённых пунктов ($D_{нас.п.}$) возникает в пределах 2 – 10 км, среднее значение $D_{нас.п.} = 12.4$ км. Распределение площадей пожаров в зависимости от $D_{нас.п.}$ похожим образом повторяет количественную гистограмму со сдвигом в сторону увеличения $D_{нас.п.}$ на 8-10 км, и пик площадей пожаров приходится на ~15 км. По данным статистики пожаров за 1947 - 1992 гг. [Korovin, 1996], пик количества пожаров находится в пределах $D_{нас.п.} = 5$ км.

ГЛАВА 3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Индексы «показателей влажности» (ПВ-1 и ПВ-2) являются модификацией комплексного показателя горимости В.Г. Нестерова [1949 г.] и рассчитываются по температуре воздуха ($T_{возд}$, °C), температуре точки росы (T_p , °C) и осадкам (p , мм) от даты «устойчивого» схода снегового покрова. Для случаев при $T_{возд} \geq 0^\circ\text{C}$ и при $T_{возд} < 0^\circ\text{C}$ каждый показатель ПВ имеет различные расчётные формулы. Суммирование величины влагодефицита, выраженного как $T_{возд} - T_p$, ведётся для всех дней с последнего случая выпадения существенных осадков.

В Канаде национальная система оценки пожарной опасности лесов (CFFDRS) состоит из двух частей: CFFWIS (Canadian forest fire weather index system) оценивает погодные условия [Van Wagner, 1987], CFFBPS (Canadian forest fire behavior prediction system) рассчитывает параметры распространения пожара из точки возгорания [Wotton, Alexander, Taylor, 2009]. CFFWIS рассчитывает ППО тонких горючих материалов (ГМ) (индекс FFMC), плотных ГМ (индекс DMC) и ГМ компактного органического слоя (индекс DC). CFFWIS также содержит индекс скорости распространения кромки пожара (ISI), промежуточную переменную BUI и итоговый индекс ППО (FWI) как интенсивность горения пожара. Входные переменные для CFFWIS: $T_{возд}$, °C, относительная влажность воздуха (RH , %), скорость ветра (w , м/с), осадки (p , мм), дата расчета.

Ежедневные метеорологические данные были взяты из сети метеостанций NCDC (National Climate Data Center, NOAA) [Lott, 2005], дополненные данными «Авиалесохраны». В зависимости от пропусков данных количество метеостанций в расчёте индексов ППО варьируется от ~250 до ~300 ежегодно.

По спутниковым данным о снеговом покрове (MODIS/Terra) определялись даты схода снега (при его покрытии $\leq 80\%$ в ячейке 0.5°) с учетом возможности возникновения пожаров при фрагментарности снегового покрова. Датой начала расчёта индексов ППО целесообразно считать первый эпизод полного схода снега, так как в интервалах (до 10 – 15 дней) между повторным эпизодическим выпадением снега $T_{возд}$ может составлять 15-20 °С, что способствует высыханию ГМ.

Проведен расчёт коэффициентов корреляции Пирсона (r) между временными рядами индексов ППО и рядами площадей пожаров в квадрате $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, содержащем данную метеостанцию. Динамика пожаров построена по суточным величинам их суммарных площадей (S_{day}) и нарастающим итогом (S_{accum}) с начала развития пожаров до момента их отсутствия в последующие 3 дня для разделения эпизодов возникновения пожаров (с продолжительностью до 35-40 дней) на фазы, в которых присутствует 2-3 пика S_{day} . Так как количество дней с пожарами на площади $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ мало по сравнению с длиной ряда индексов ППО, то выборка производилась для дней при $S_{day/accum} > 0$ за все годы, в которых возникали пожары в окрестностях одной метеостанции.

Рассеянность в пространственном распределении значимых r (r_{signif}) свойственна корреляциям индексов ПВ-1 и ПВ-2 с S_{accum} , а компоненты CFFWIS имеют лучшие показатели r_{signif} в лесной растительности (хвойные леса). Использование скользящего среднего за 5 предыдущих дней для FWI приводит к лучшему согласованию с S_{accum} , для ПВ-1 этот метод работает хуже. Доля r_{signif} колеблется от $\sim 1/3$ до $\sim 2/3$ от общего количества r (табл. 2). Индексы FWI и ISI точнее описывают динамику S_{day} . ПВ-1/2, BUI и DMC лучше прогнозируют вариации S_{accum} . При выборке крупных пожаров ($S_{day} \geq 1-5$ тыс. га. и $S_{accum} \geq 1-10$ тыс. га) r_{signif} повышается от ~ 0.45 до ~ 0.62 для многих индексов ППО.

Таблица 2. Усреднённые значения r_{signif} между индексами ППО и площадями пожаров

| | | ПВ-1 | ПВ-1 _{ср} | ПВ-2 | FWI | FWI _{ср} | DMC | DC | BUI | ISI |
|--|-------------|---------------|--------------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Составной ряд (1996-2008 гг., 370 м.с.) | S_{day} | 0.45 (87) | 0.49 (64) | 0.49 (55) | 0.45 (94) | 0.47 (76) | 0.46 (64) | 0.51 (33) | 0.47 (54) | 0.43 (103) |
| | S_{accum} | 0.5 (163) | 0.5 (167) | 0.48 (122) | 0.44 (115) | 0.44 (115) | 0.49 (128) | 0.52 (59) | 0.51 (101) | 0.42 (97) |
| Выборка крупных пожаров, (1996-2008 гг., 183 м.с.) | S_{day} | 0.6 (117) | 0.58 (115) | 0.59 (117) | 0.63 (122) | 0.61 (120) | 0.61 (119) | 0.55 (107) | 0.61 (122) | 0.63 (123) |
| | S_{accum} | 0.65 (133) | 0.66 (130) | 0.63 (135) | 0.61 (126) | 0.62 (126) | 0.66 (132) | 0.6 (118) | 0.65 (135) | 0.57 (117) |

В скобках указано количество метеостанций, по данным которых получена значимая ($\alpha = 0.95$) корреляция и рассчитано среднее значение r_{signif} . (*м.с. – метеостанции)

Проведенный анализ выявил приоритетные индексы ППО в прогнозировании двух характеристик (S_{day} , S_{accum}) динамики пожаров на локальном уровне. ПВ-1/ПВ-2 требуют практической доработки для лучшего прогнозирования S_{day} . CFFWIS необходимо адаптировать к типам растительности в Сибири и оценить её преимущества комплекс-

но для всей территории исследования, не ограничиваясь только расположением метеостанций.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ИНДЕКСОВ ППО

Разработка индексов ППО основана на нескольких базовых ГМ, что приводит к ошибкам в оценке потенциала возгорания для всего спектра ГМ. В то же время различия в условиях произрастания, продолжительности пожарного сезона, скорости высыхания ГМ и длины межпожарных интервалов [Soja et al., 2006] имеют существенное значение. Были предложены три метода нормализации индексов ППО по типам растительности. Для работы с большим пространственным покрытием были использованы оперативные модельно–интерполированные данные ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) с разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

В линейном методе критерий нормализации индексов ППО определен по их максимальным значениям (Max_i) до нормализации за период 2001 - 2007 гг. в пределах распространения каждого i –го типа растительности. Ряды значений индексов ПВ-1, ПВ-2 и FWI были нормированы с учетом весовых коэффициентов по фракциям покрытия типами растительности (W_i) в 0.5° ячейке:

$$WFDI_{norm} = WFDI / \sum_{i=0}^N (Max_i \times W_i), \quad (1)$$

где N –количество типов растительности; $WFDI$ –индекс ППО; $WFDI_{norm}$ –нормализованный индекс ППО.

Зоны высоких значений Max_i сосредоточены на юго-западе территории с трендом уменьшения Max_i по мере увеличения широты. Низкий показатель Max_i свойственен высокогорным местностям с более влажными и холодными условиями, что подтверждается расчетом средней суточной T_{6030} , средней нормы осадков и среднего количества дней без осадков (за 2001-2007 гг.) за периоды при $T_{6030} \geq 0^\circ\text{C}$. Профили зон средних величин T_{6030} и p не совпадают с распределением Max_i , следовательно, Max_i – это вероятностное событие сочетания граничных значений переменных T_{6030} и p .

Верификация $WFDI_{norm}$ проводилась по данным о пожарах (AVHRR и MODIS отдельно) наподобие метода в гл. 3, но усредненные коэффициенты r представляют большую пространственную выборку с наличием пожаров. Коэффициенты r для $WFDI_{norm}$ не меняются по сравнению с верификацией без нормализации. Выявлены существенные недостатки метода: а) во многих случаях индексы ППО не воспроизводят сезонность и время возникновения пожаров; б) отсутствует внутригодовое перераспределение значений индексов ППО; в) величины Max_i зависят от длины анализируемого периода.

Во втором подходе метод нелинейной нормализации ППО, ранее примененный в модели пожаров Reg-FIRM [Venevsky et al., 2002], был модифицирован для перераспределения пропорций сезонных вариаций $WFDI$ введением шести категорий

ППО (табл. 3). Предварительно определенные Max_i присваиваются пятому классу ППО («сверхвысокая ППО»), что предусматривает возможное превышение Max_i до «экстремальной ППО» из-за ограниченности тестового периода. Интервалы значений индексов ППО остальных категорий определяются геометрической регрессией с коэффициентом 1.8 (аналогично с системой CFFWIS [Van Vagner, 1987]). Значения $WFDI_{norm}$ заданы в перцентилях с учетом увеличения их процентного отношения к входным $WFDI$ с увеличением класса ППО.

$$WFDI_{norm} = 1 - \exp(-\alpha_w \times WFDI), \quad (2)$$

где α_w – коэффициент нормирования, рассчитанный для каждого типа растительности и усредненный по всем классам ППО.

Таблица. 3. Интерпретация ППО по индексу FWI для хвойного вечнозелёного леса

| ППО (класс) | Диапазон входных значений FWI | %-ное перераспределение FWI | α | α среднее | FWI на выходе |
|------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------|------------------|---------------|
| 6. Экстремальная | 38.16 - 45.78+ | 0.85 - 0.99 | 0.10 | 0.06 | 0.91 - 0.95 |
| 5. Сверхвысокая | 21.16 - 38.15 | 0.75 - 0.85 | 0.05 | | 0.75 - 0.91 |
| 4. Высокая | 11.74 - 21.15 | 0.5 - 0.75 | 0.06 | | 0.53 - 0.75 |
| 3. Средняя | 6.52 - 11.73 | 0.3 - 0.5 | 0.06 | | 0.34 - 0.53 |
| 2. Низкая | 3.62 - 6.51 | 0.2 - 0.3 | 0.05 | | 0.21 - 0.34 |
| 1. Очень низкая | 0.01 - 0.2 | 1 - 3.61 | 0.06 | | 0.06 - 0.21 |
| 0. Нулевая | 0 - 0.01 | 0-1 | - | | 0.0 - 0.06 |

При данном расчете коэффициенты α образуют неравенство:

$$\alpha_{\text{степи/луга}} > \alpha_{\text{с/х земли}} > \alpha_{\text{ХЛЛ}} > \alpha_{\text{листв.лес}} > \alpha_{\text{ХВЛ}} > \alpha_{\text{тундра}} > \alpha_{\text{смеш.лес}} > \alpha_{\text{кустар.}} > \alpha_{\text{леса/компл.}} > \alpha_{\text{забол.т}} \quad (3)$$

Рассмотрена гипотеза, что ранжирование α в соответствии с относительной скоростью высыхания этих ГМ приведет к лучшему описанию динамики пожаров индексами ППО. С учетом различий в скорости испарения и поглощения влаги в разных видах подстилки однотипного древостоя, в скорости десорбции кроны деревьев и с приблизительной оценкой структуры ГМ у обобщенных классов GLC2000 условно принято неравенство:

$$\alpha_{\text{степи/луга}} > \alpha_{\text{с/х земли}} > \alpha_{\text{тундра}} > \alpha_{\text{кустар.}} > \alpha_{\text{леса/компл.}} > \alpha_{\text{листв.лес}} > \alpha_{\text{ХВЛ}} > \alpha_{\text{ХЛЛ}} > \alpha_{\text{смеш.лес}} > \alpha_{\text{забол.т}} \quad (4)$$

Различие совокупного воздействия метеорологических факторов, выраженных в $WFDI$, на скорость пожарного созревания типов растительности реализовано с помощью введения множителя δ при α , меняющегося от 0.7 (забол. тер-рии) до 3 (степи/луга). Понижающий коэффициент ($\delta < 1$) введен для типов, произрастающих в сырых условиях (забол. территории и прибрежная растительность). Остальные типы разделены на три группы по скорости пожарного созревания: а) леса (ХВЗ ($\delta = 1.15$), ХЛЛ ($\delta = 1.2$), смешанный лес ($\delta = 1.29$), листопадный лес ($\delta = 1.5$)); б) кустарниковые ($\delta = 2.21$) и тундра ($\delta = 2.5$); в) травянистые (степи/луга ($\delta = 3.0$), с/х. площади ($\delta = 2.8$)).

Был проведён корреляционный анализ $WFDI_{norm}$ с S_{daily} и S_{accum} (по MODIS и NOAA отдельно). Параметрическая α -нормализация приводит к увеличению площади территории с положительной корреляцией ($N_{r>0}$) для большинства индексов ППО на 3-6 %, но количество r_{signif} и их среднее значение уменьшается по сравнению с линейной нормализацией. Дневную динамику пожаров S_{daily} в тундре лучше других описывают индексы ISI и FWI ($r_{aver(>0)} \approx 0.3$), среди хвойных лесов $r_{aver(>0)} \approx 0.2$, для лиственного леса лучший показатель $r_{aver(>0)}$ у ISI (≈ 0.2) и худший у ПВ-1 (≈ 0.05). Интегральную величину площадей пожаров (S_{accum}) для большинства типов растительности относительно лучшим образом моделирует индекс ПВ-1: $r_{aver(>0)} \approx 0.3 - 0.4$ для хвойных лесов, тундры, кустарников и заболоченных территорий. Худшую связь с S_{accum} показывают индексы ПВ-1, FWI, ISI, FFMC для смешанных лесов и с/х площадей. Результаты корреляции S_{accum} с группой индексов ПВ-2, BUI, DC и DMC обнаруживают сходство. Для хвойных лесов, тундры и кустарниковой растительности $r_{aver(>0)} \approx 0.35$, заболоченных территорий $r_{aver(>0)} \approx 0.25$, смешанных и лиственных лесов и травянистой растительности $r_{aver(>0)} \approx 0.15$, наихудшая связь с пожарами - на с/х площадях. Подобное распределение наблюдается и в анализе корреляций индексов ПВ-2, BUI, DC, DMC при тестировании по дневной динамике пожаров S_{daily} , но при этом показатель $r_{aver(>0)}$ уменьшился на $\sim 0.05 - 0.15$.

Дополнительно проведен корреляционный анализ пожаров с $WFDI_{norm}$, где величины Max_i рассчитывались локально (по каждой 0.5° ячейке) из рядов данных индексов ППО за исследуемый период. Результаты этого анализа предельно близки к результатам с α -нормализации, которые также незначительно различаются от $r_{aver(>0)}$ при расчете по метеоданным (NCDC).

Возникновение средних и крупных пожаров при $WFDI \approx 0$ может указывать на неточности в хронологии осадков. Сравнительный анализ осадков по метеостанциям (p_{NCDC} , 120 шт. без пропусков в данных) с осадками по ECMWF (p_{ECMWF}) выявил асинхронность в их дневных хронологиях, которая варьируется от $\sim 30\%$ до $\sim 78\%$ количества дней в рядах и выражена как $p_{NCDC} - p_{ECMWF}$ при $p_{ECMWF} \neq p_{NCDC}$. Расхождение в данных приводит к различному уровню ППО (рис. 4).

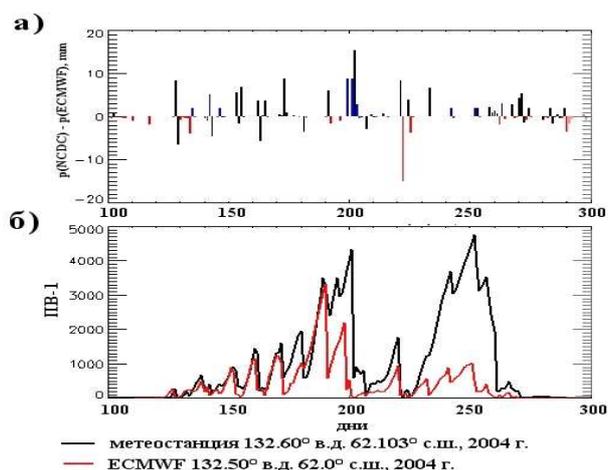


Рис. 4. а) разница в дневном количестве осадков по данным метеостанции (P_{NCDC}) и прогноза (P_{ECMWF}); б) индекс ПВ-1 (темным - NCDC, светлым - ECMWF)

Предложенные методы нормализации индексов ППО, рассчитанные по климатическим данным ECMWF с учетом типов растительности, не приводят к многократному улучшению их линейной пропорциональности размерам пожаров, но

особенности применения индексов ППО в Сибири были предварительно определены для модуля пожаров в ORCHIDEE. Метод α -нормализации предоставляет возможность регулирования параметров алгоритма пожаров под специфичные типы растительности.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ПОЖАРОВ В ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ORCHIDEE

Биогеохимическая модель ORCHIDEE (“ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems”) [Krinner et al., 2005] входит в состав глобальной климатической модели IPSL_CM4. Результаты расчётов IPSL_CM4 участвуют в реализации межправительственной программы по изучению изменения климата [IPCC 2004, 2007]. ORCHIDEE – это процессо–ориентированная модель, которая рассчитывает динамику органического углерода ($C_{\text{орг}}$) и потоки газо- и энергообмена между наземными экосистемами и приграничным слоем атмосферы. ORCHIDEE состоит из трех моделей: SESHIBA, LPJ и STOMATE. **SESHIBA** – это гидрологическая модель, **LPJ** – описывает процессы изменения видового разнообразия. Процессы фотосинтеза, распределения углерода, разложения $C_{\text{орг}}$, динамики углерода в почве, поддержания жизнедеятельности растений, дыхания растений и фенологию выполняет модель **STOMATE**. ORCHIDEE оперирует с 13 типами растительности (ТР), на территории исследования представлено 9 типов. Деление на пулы органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в экосистемах в ORCHIDEE осуществляется по их функциональному признаку.

Схема пожарного модуля основана по принципу «треугольника пожарной среды» [Chuviesco, 2003; Schoennagel, 2004] и реализована в качестве алгоритма (рис. 5), который функционирует на суточной шкале. Вероятность возникновения пожара (P_{fire}) выражается через произведение потенциала по условиям погоды (P_{WFDI}), потенциала запаса ГМ (P_{fuel}) и вероятности наличия источника возгорания (P_{ing}). *Погодные условия* рассчитываются по индексу FWI. Единый FWI для всех ТР в i -той единице площади (ЕП) становится частным для каждого ТР ($P_{\text{WFDI}}^{\text{PFT}}$) после нормализации с помощью коэффициентов α . Дневные значения $P_{\text{WFDI}}^{\text{PFT}}$ оцениваются по уровням ППО, возникновение низового пожара возможно при высоком классе ППО. Доступное количество ГМ, подверженного первоначальному возгоранию ($C_{\text{орг}}^{\text{пож}}$, гС/м²), рассчитывается суммированием $C_{\text{орг}}$ в двух компонентах подстилки (структурный и метаболический слой напочвенного отпада). P_{fuel} считается высоким для i -той ТР в ЕП при $C_{\text{орг}}^{\text{пож}} \geq 200$ гС/м² (среднее минимальное $C_{\text{орг}}^{\text{пож}}$ для распространения пожара).

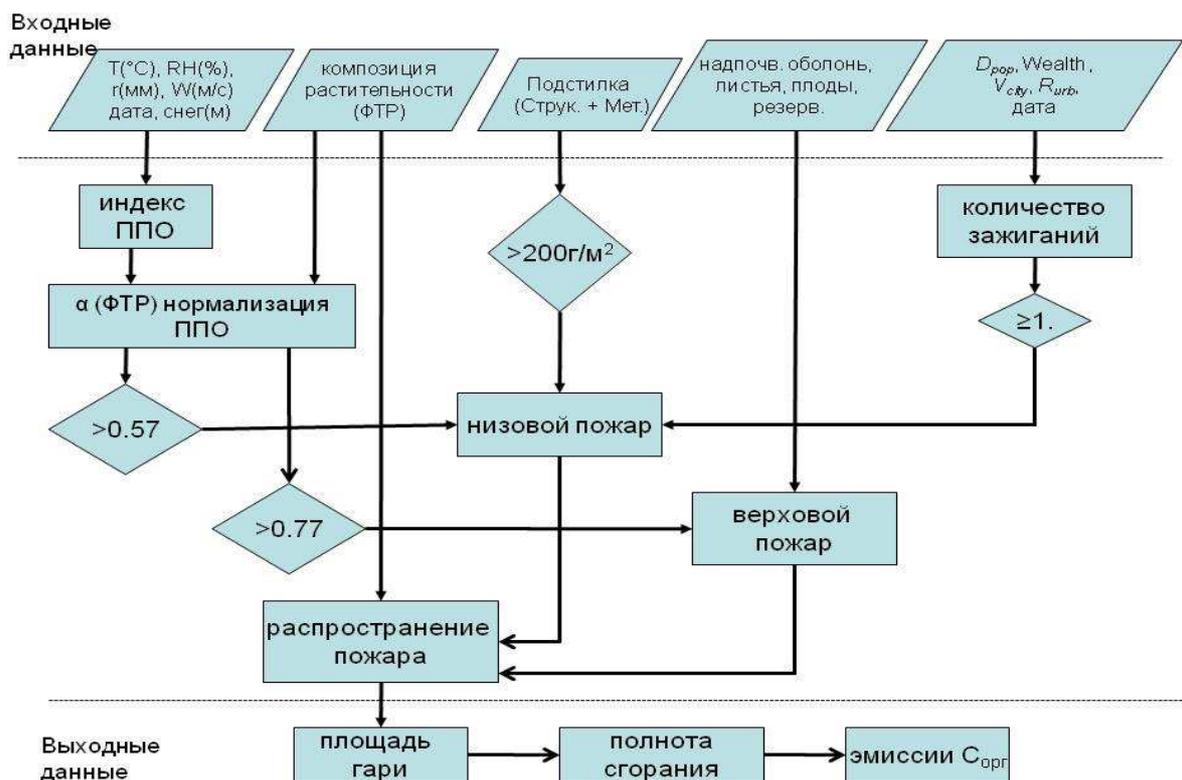


Рис. 5. Алгоритмическая блок-схема модуля пожаров в модели ORCHIDEE

Наличие *источников возгорания* имеет вероятностный характер возникновения. Эмпирическим методом определено, что использование P_{ing} случайного характера с вероятностью 0.1% наиболее близко соответствует диапазону значений ежегодного количества пожаров по данным AVHRR и MODIS для Сибири за 1996 – 2005 гг.

Канадская модель распространения пожара (CFFBPS) задействована в модуле пожаров для расчета основных параметров итоговых площадей пожаров. Соотнесение эталонных типов ГМ в CFFBPS с типами растительности в ORCHIDEE проведено методом обобщения последних по признакам их функциональности.

Пожар может возникнуть синхронно в смежных ЕП при наличии обширного фронта высокой ППО, но независимо от данной ЕП, так как размер одной ЕП ($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$) не превышает S_{mean}^{Total} (см. гл. 2), и задана условная замкнутость S_{fire} в пределах одной ЕП. При превышении рассчитанной S_{fire} размеров одного ТР (внутри ЕП) возможно распространение пожара на смежные ТР, если их P_{WFDI} и P_{fuel} соответствуют пожароопасным условиям. В ином случае S_{fire} лимитируется пределами одной ТР. Максимальная длительность одного пожара ограничена двумя днями исходя из статистики пожаров за периоды 1996-2008 гг. (см. гл. 2) и 1947 – 1992 гг. [Korovin, 1996]. Также длительность пожара зависит от P_{WFDI} и P_{fuel} , динамика которых может сократить продолжительность пожара до одного дня. Переход низового пожара в верховой происходит при достижении индексом FWI категории «очень высокой» ППО (0.77 – 0.96) либо при ненормализованном FWI ≥ 40 единиц. Во втором случае порог значений данного индекса (FWI_{crit}) варьируется по разным ТР.

Таблица 4. Горимые и негоримые компоненты ORCHIDEE

| Профиль | Подверженные горению | Не подверженные горению |
|--------------|---|--|
| надпочвенный | листва; заболонь; метаболическая и структурная подстилка | оболонь; запасующее вещество |
| почвенный | - | структурная подстилка; метаболическая подстилка; почвенные слои; корни |

В модуле пожаров приняты усреднённые коэффициенты полноты сгорания для разных частей углеродных пулов (табл. 4) на основании оценок параметров горения биомассы различных типов растительности из литературных источников. Общее количество сгоревшей биомассы в одном ТР определяется суммой фракций сгоревшего $C_{орг}$ в каждом компоненте:

$$B_{fire}(i, j) = \sum_{k=1}^{N_p} C_{com}(k) \times B_{bio}(i, j, k) \times F_{ba}(i, j) \quad (5)$$

где B_{fire} – количество сгоревшей биомассы ($гC/м^2$); N_p – количество пулов $C_{орг}$ в биомассе; C_{com} – коэффициент полноты сгорания для k -того пула биомассы (%); B_{bio} – количество биомассы ($гC/м^2$) в k -том пуле; F_{ba} – площадь гари ТР; i, j – индексы данных по долготе и широте.

Оставшиеся компоненты (несгоревшие) трансформируются в структурную часть подстилки и далее в почву. Модуль пожаров вносит изменения в содержание $C_{орг}$ только при возникновении пожара.

Результаты работы модуля пожаров оценены за период 1989 – 1995 гг. Максимальные величины S_{fire} в одной ЕП варьируются в пределах 15 – 40 тыс. га, что находится в нижнем интервале диапазона S_{mean}^{Total} (23 – 1250 тыс. га). Величина суммарного потока эмиссий $C_{орг}$ от пожаров варьируется от 20 до 75 тг $C/год$ для всей территории исследования, а в пределах одной ЕП эмиссии достигают $2600 г C/м^2/год$ (рис. 6).

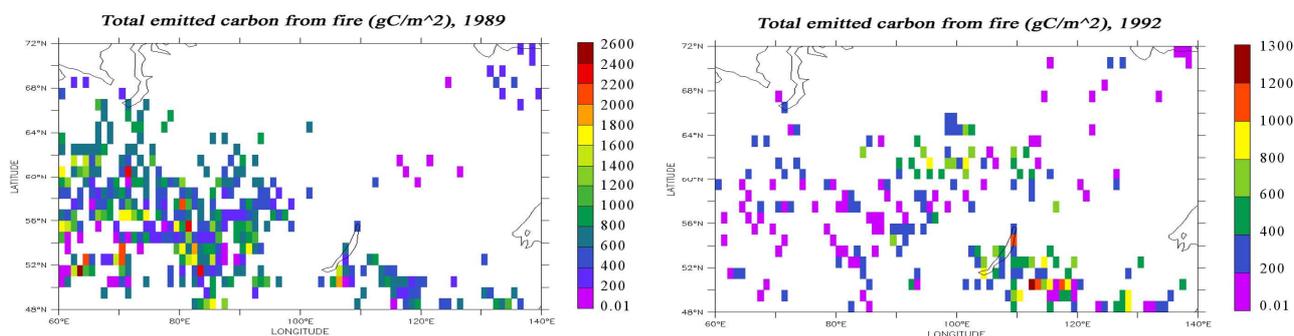


Рис. 6. Расчетное суммарное количество эмиссии $C_{орг}$ ($гC/м^2$) от пожаров в 1989 г. и 1992 г.

Оценка послепожарных последствий. При сценарии низового пожара в бореальном лиственном лесу происходит уменьшение $C_{орг}$ в подстилке, но изменения динамики валовой и чистой первичной продукции (GPP и NPP) не существенны. При верховом пожаре запас $C_{орг}$ в подстилке также уменьшается, и деструкция древостоя отражается на дальнейшем ходе продуктивности ($GPP \approx 0$, рис. 7), NPP становится отрицательным, что

обусловлено присутствием аутотрофного дыхания у оставшейся живой части древостоя. В дальнейшем остатки пораженного древостоя переходят в структурную подстилку, так как оценка жизнеспособности TP в ORCHIDEE происходит по параметрам фитомассы кроны, которая была уничтожена огнем.

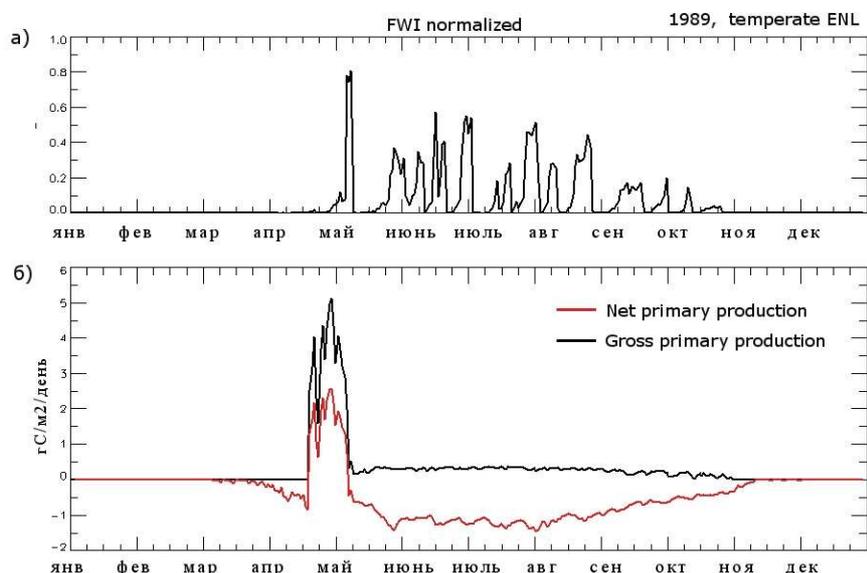


Рис. 7. Динамика индекса FWI (а) в 1989 г. и изменения в сезонном ходе GPP и NPP (б) после верхового пожара в хвойном вечнозеленом лесу умеренных широт

Содержание углерода в подстилке хвойных листопадных и лиственных лесов возобновляется быстрее, чем у вечнозеленых лесов, и может достичь за 1-2 года двукратного увеличения «допожарного» уровня. Восполнение $C_{орг}$ в подстилке вечнозеленых лесов происходит линейно, что связано с регулярным отпадом неживой биомассы. В листопадных лесах этот процесс носит сезонный характер, и содержание $C_{орг}$ в подстилке резко увеличивается в осенний период.

Закключение подытоживает все полученные выводы с точки зрения поставленной цели и достигнутых результатов проделанной работы.

Основные результаты и выводы

1. На основании анализа спутниковых данных о пожарах за 1996-2008 гг. в Сибири подтверждено заметное усиление сезонности в территориальной динамике крупных зон пожаров. Существует тренд увеличения ежегодного количества и площадей пожаров. Определены особенности длительности пожаров и их распределения по типам растительности.

2. Показано, что канадская система ППО (CFFWIS) может быть использована в оригинальном виде только для ограниченной части территории Сибири в зависимости от требуемых параметров оценки ППО выборочно по нескольким индексам и применительно к узкому кругу типов растительности. Российские индексы ПВ-1 и ПВ-2 также не универсальны в описании динамики площадей пожаров.

3. Предложенные методы параметризации индексов ППО являются альтернативным решением в задаче улучшения качества прогноза возникновения и развития пожаров по условиям погоды. Показано, что учет различий в составе растительного покрова может увеличить эффективность использования различных индексов ППО.

4. Разработанный модуль пожаров в модели ORCHIDEE выполнен алгоритмически в качестве блока программных процедур, реализация которого сочетает методы эмпирического моделирования параметров пожаров с методами аппроксимации оценок полноты сгорания горючих материалов. Тестирование разработанного модуля пожаров показало, что данный подход применим в задачах оценки пожарных эмиссий на крупномасштабной шкале.

5. Величина суммарной эмиссии углерода от пожаров варьируется от 20 до 75 тг С/год, максимальное годовое количество эмиссии на локальном уровне с площади $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ составило 2600 г С/м²/год за тестовый расчетный период.

6. Воздействие верховых пожаров на растительность приводит к резкому снижению её продуктивности и запаса углерода, что не отмечается в случаях низовых пожаров. По модельным данным восполнение углерода в подстилке хвойных листопадных и лиственных лесов происходит за 1-2 года и может достичь двукратного увеличения «допожарного» уровня.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. **Рубцов А.В.** Системный анализ погодной пожарной опасности при прогнозировании крупных пожаров в лесах Сибири / **А.В. Рубцов**, А.И. Сухинин, Е.А. Ваганов // Исследование Земли из космоса. - 2010. - № 3. - С. 62–70.
2. **Рубцов А.В.** Классификация территории Сибири по фактической горимости с использованием спутниковых данных / **А.В. Рубцов**, А.И. Сухинин, Е.А. Ваганов // Журнал Сибирского федерального университета (Биология). - 2010. - № 1. - С. 30–39.

Публикации в других научных изданиях

1. Шишов В.В. / Пространственные модели отклика характеристик продуктивности лесной растительности на региональные и глобальные изменения климата / В.В. Шишов, **А.В. Рубцов** // Биоразнообразие и динамика экосистем: информационные технологии и моделирование / под ред. В.К. Шумного [и др]. – Новосибирск: СО РАН (Интеграционные проекты СО РАН), 2006. - С. 547-557.

2. **Рубцов А.В.** Анализ длительности пожаров в Сибири и антропогенных факторов их возникновения по спутниковым данным / **А.В. Рубцов**, А.И. Сухинин // Леса России в XXI веке: Материалы четвертой международной научно-практической интернет-конференции. - 2010. - С. 85-89.
3. **Рубцов А.В.** Оценка фактической горимости территории Сибири, динамика площадей пожаров и верификация моделей погодной пожарной опасности / **А.В. Рубцов** // Исследования компонентов лесных экосистем Сибири: Материалы конференции молодых ученых. - 2010. – С. 59 - 63.
4. **Рубцов А.В.** Анализ фактической горимости территории Сибири и оценка прогностических способностей моделей погодной пожарной опасности / **А.В. Рубцов** // XIII Конференция молодых ученых Красноярского научного центра СО РАН: Сборник трудов. - 2010. – С. 44 – 46.
5. **Рубцов А.В.** Оценки методов обнаружения пожаров по спутниковым данным в Сибири за 2002 год / А.В. Рубцов, И.Р. Арнольдов, Н.А. Донцов // В мире научных открытий (по материалам III Всероссийской научно-практической конференции "Научное творчество XXI века" с международным участием). - 2010. - №6. – С. 281 – 287.