

Картографирование и оценка поврежденных пожарами лесов и пожарных эмиссий углерода по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения

Е.Н. Сочилова, Д.В. Ершов

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mails: elena@ifi.rssi.ru, ershov@ifi.rssi.ru*

Лесные пожары являются одним из основных источников парниковых газов в атмосферу Земли. Для расчета объемов эмиссии углерода в результате лесных пожаров в качестве одного из входных параметров необходимо определить величину, характеризующую степень повреждения насаждений. В качестве этой величины рассматривается доля площади древесного полога насаждения, занятая погибшими после лесного пожара деревьями. В статье приводятся результаты исследований по оценке степени повреждения лесной растительности от пожаров с использованием данных спутниковой съемки высокого пространственного разрешения (МСУ-Э, Landsat-ETM+) в сочетании с данными наземных измерений. Для идентификации свежих гарей использовались результаты обработки изображений низкого пространственного разрешения SPOT-VEGETATION. В качестве тестового региона была выбрана центральная часть Красноярского края, где ежегодно фиксируется большое количество очагов возгорания лесов. Работа выполнялась при поддержке Европейского космического агентства в рамках проекта GMES Networking with Russia and Ukraine 2004: «Forest Ecosystem Monitoring in Northern Eurasia» (FEMINE).

Введение

Красноярский край расположен в Центральной Сибири и является уникальным регионом, охватывающим практически все лесорастительные зоны северной Евразии. Общая площадь земель относящихся к лесному фонду Красноярского края составляет 137,2 млн. га. Площадь покрытых лесом земель составляет 89,2 млн. га (65%). На территории края произрастают такие основные лесообразующие породы, как сосна, ель, лиственница, кедр, пихта, а также береза и осина. Тестовый регион представлен в основном хвойными вечнозелеными лесами, а также лиственными насаждениями березы и осины, возобновляющимися на старых гарях и вырубках. Леса региона находятся под постоянным воздействием природных и антропогенных факторов, а именно лесных пожаров, рубок леса, массового размножения насекомых-вредителей леса и в частности сибирского шелкопряда.

Дополнительным основанием для выбора региона также послужило наличие информации о лесных пожарах по данным наземных и авиационных наблюдений, данных полевых обследований повреждений лесов на гарях разных лет, спутниковых изображений низкого, среднего и высокого пространственного разрешения разных лет.

Постановка задачи

Лесные пожары являются одним из основных источников парниковых газов в атмосферу Земли [1]. Для расчета объемов эмиссии углерода в результате лесных пожаров в качестве одного из входных параметров необходимо определить величину, характеризующую степень повреждения насаждений [2]. В качестве этой величины рассматривается доля площади древесного полога насаждения, занятая погибшими после лесного пожара деревьями. Используя в сочетании данные спутниковой съемки высокого и низкого пространственного разрешения и наземных измерений, можно оценить степень повреждения лесной растительности от пожаров. Целью работы является проведение ис-

следований информативных возможностей спутниковых данных высокого пространственного разрешения для оценки повреждений лесов от пожаров и эмиссии углерода в атмосферу Земли.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

- Разработка метода выявления пройденной огнем площади по разновременным изображениям высокого пространственного разрешения;
- Сравнительный анализ независимых оценок степени повреждения лесов, полученных на тестовых пожарах в одной лесорастительной зоне;
- Формирование экспериментального набора тестовых гарей и оценок поврежденности лесов от пожаров;
- Апробация метода оценки пожарной эмиссии углерода на тестовой гари 2004 года с использованием спутниковых данных и материалов лесоинвентаризации.

Методология исследования

Исследования основываются на комплексном использовании данных дистанционного зондирования Земли (спутниковые изображения различного пространственного разрешения до и после пожаров), материалов наземных измерений и лесоустройства. Применяя технологии сравнительного анализа разновременных изображений до и после пожаров в пределах одного фенологического сезона, а также, используя модели расчета запасов лесных горючих материалов (ЛГМ) и оценки пожарных эмиссий, можно оценить размеры эмитированного в атмосферу углерода в результате лесных пожаров. На рис. 1 схематически представлена методология исследований, включающая три основных этапа работ:

1. выделение контуров пройденных огнем площадей пожаров;
2. сравнительная оценка степени повреждения лесов от пожаров;
3. оценка пожарной эмиссии углерода на тестовой гари 2004 года.

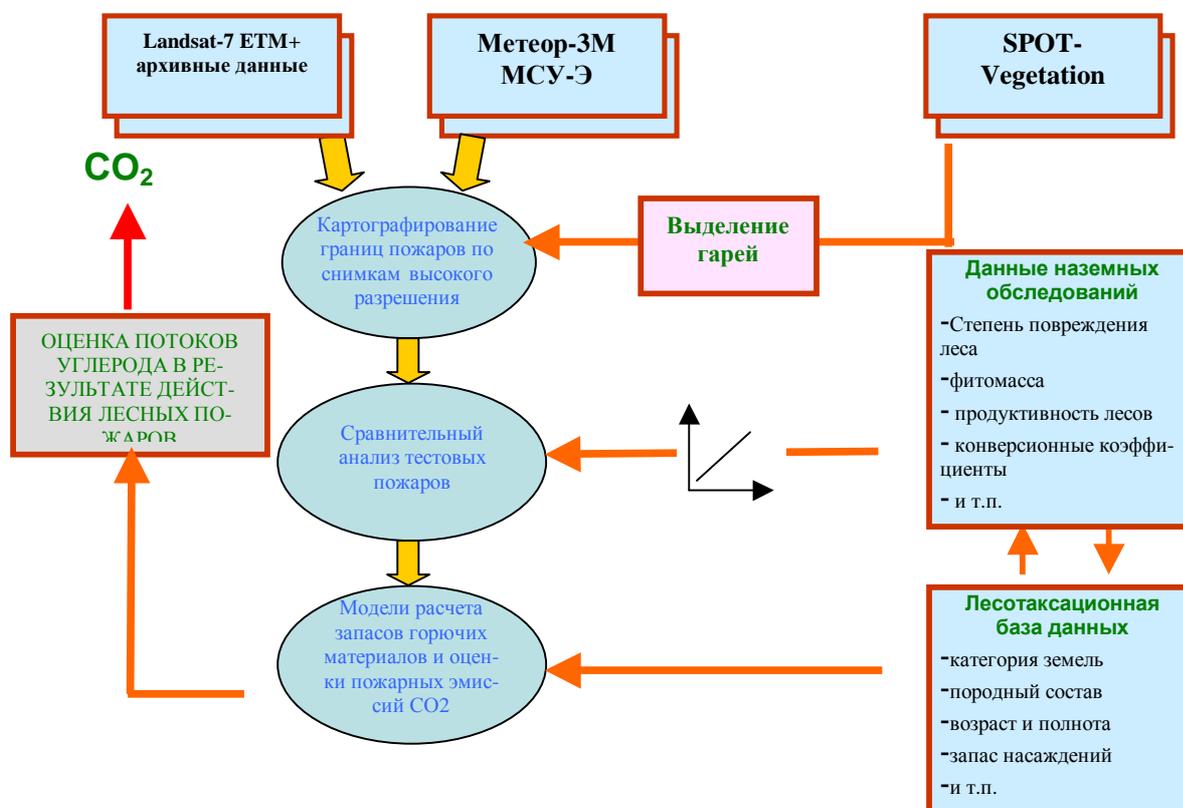


Рис.1. Блок – схема экспериментальных исследований

Картографирование пройденных пожарами площадей. Методика выделения контуров пожаров основывается на анализе нормализованного разностного вегетационного индекса разновременных изображений высокого разрешения до и после пожара. Для идентификации площадей, пройденных пожарами, используются результаты обработки изображений пространственного разрешения SPOT-VEGETATION, методика которой приводится в работе [3]. На основе вычисленных по разновременным спутниковым изображениям значениям $NDVI(t_1)$ и $NDVI(t_2)$, первое из которых соответствует состоянию насаждений до пожара, а второе после него, формируется разностное изображение: $\Delta NDVI = NDVI(t_2) - NDVI(t_1)$.

Этап коррекции контура пожара может быть выполнен путем анализа гистограммы распределения значений $\Delta NDVI$ внутри этого контура, вариации которых в каждом j -ом пикселе спутникового изображения обусловлены влиянием двух факторов, и могут быть выражены в виде: $\Delta NDVI_j = \Delta NDVI_{cj} + x_j$, где $\Delta NDVI_{cj}$ – изменения $NDVI$, обусловленные детерминированными факторами деструкции и развития лесной экосистемы, приводящие соответственно к снижению и увеличению проективного покрытия полого насаждения; x_j – изменение $NDVI$, обусловленное влиянием совокупности случайных факторов. Значения $\Delta NDVI_{cj}$ будут лежать в отрицательной области, а гистограмме распределения $\Delta NDVI_j$ будет свойственна асимметрия или бимодальность.

К участкам лесных насаждений, претерпевшим изменения в результате пожара, может быть отнесено множество $\{C_j\}$ пикселей спутникового изображения удовлетворяющих условию внутри области пожара: $\Delta NDVI_j \in [\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$, где μ – среднее значение, а σ – среднее квадратичное отклонение. В качестве среднего значения интервала используется максимум гистограммы принадлежащей пожарищу. Полученное множество пикселей $\{C_j\}$ позволяет выявить пройденные огнем участки лесных насаждений и оценить их площади на спутниковых изображениях высокого пространственного разрешения.

Сравнительный анализ. Целью исследования является изучить возможность распространения калибровочных характеристик для оценки степени повреждения лесов на пожарищах в пределах одной лесорастительной зоны и близких фенологических фазах. Для восстановления параметров калибровочной функции используются индекс разности $NDVI$ до и после пожара и наземные измерения степени повреждения огнем лесной растительности. Методология работ по сбору данных наземных измерений, обработке спутниковой информации, оценке степени повреждения лесов на тестовых горях и пожарных эмиссии углерода основываются на исследованиях, изложенных в [2].

Сравнение результатов осуществляется с помощью регрессионного и корреляционного анализа, позволяющего оценить уровень взаимосвязи нормализованного разностного индекса до и после пожара и степени повреждения лесной растительности на тестовых горях.

Оценка повреждений лесов от пожаров. При помощи калибровочной функции разность $NDVI$ трансформируется в значения степени повреждения лесов, используемая в дальнейшем для моделирования интенсивности пожара и оценки размеров пожарной эмиссии углерода в атмосферу.

Оценка пожарных эмиссий. По данным лесоинвентаризации и степени повреждений лесов от пожара рассчитываются запасы лесных горючих материалов до пожара, определяется интенсивность горения и тип пожара, что позволяет оценить количество углерода, эмитированного в атмосферу в результате горения [2].

Экспериментальные данные

Спутниковые изображения. Для проведения исследований по оценке степени повреждения лесов на свежих горях были собраны наборы спутниковых данных SPOT4/VEGETATION, Meteor-3M/MCY-Э и Landsat-7/ETM+ [<http://spot-vegetation.com>; <http://smisdata.iki.rssi.ru>; <http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>], наземные измерения степени повреждения от пожаров разных лет и выборочные материалы аэрофотосъемки.

Подбор спутниковых изображений высокого пространственного разрешения осуществлялся с использованием карты гарей 2001-2004 гг., полученной по результатам обработки данных SPOT4-VEGETATION [4]. Карта позволила определить местоположение гарей на тестовом регионе, а также временной период действия лесных пожаров.

Основным критерием выбора спутниковых изображений является наличие этих данных до и после пожара. Дополнительно учитывались такие факторы, как отсутствие облачности и дымовых шлейфов от пожаров, сезонность, наличие близких спектральных диапазонов и согласованность пространственного разрешения.

В результате было отобрано 3 изображения Landsat-7 (использовались для оценки состояния растительности до пожара) и 4 изображения МЕТЕОР-3М/МСУ-Э с 10 лесными гарями разных лет.

Собранные спутниковые изображения пространственно совмещались между собой и взаимно калибровались. На завершающей стадии подготовительных работ из них формировались фрагменты изображений поверхности до и после пожара (свежие пожарища).

Данные наземных измерений и лесоустройства. Основными источниками наземных данных являются:

- Материалы лесоустройства Усольского и Манского лесохозяйственных предприятий 1993 и 1997 гг., содержащие таксационные характеристики насаждений;
- Аэрофотоснимки масштаба 1:10000 на территорию поврежденных огнем насаждений;
- Выборочные маршрутные аэрофотосъемки масштаба 1:2500;
- Материалы наземных обследований тестовых пожарищ, включающих данные учета пробных площадей и результаты обработки образцов лесных горючих материалов;

Для оценки запасов углерода в лесной растительности, размеров его годичного депонирования и объемов пожарных эмиссий в качестве нормативно-справочной информации использовались:

- База данных по фитомассе и продуктивности лесных экосистем [1];
- Таблицы хода роста нормальных древостоев основных лесообразующих пород [5];
- Таблица конверсионных коэффициентов, характеризующих соотношение между запасами стволовой древесины и массой различных фракций фитомассы в насаждениях различных лесообразующих пород и групп возраста древостоев [6];
- Таблица коэффициентов аллометрических уравнений для расчета фитомассы подроста и естественного возобновления [7].

Данные дешифрирования аэрофотоснимков и полевые обследования тестовых пожаров используются для восстановления калибровочных зависимостей между значениями вегетационного индекса спутниковых изображений и степени повреждения огнем лесной растительности.

Для расчета запасов лесных горючих материалов и пожарных эмиссии углерода используются материалы лесоустройства.

При обследовании территории пожара определялся: тип горения (верховой, низовой, подземный); тип леса; класс бонитета; состав, возраст, средняя полнота погибшего древостоя; запас на 1 га сухостойных деревьев и валежа, а также породный состав и запас сохранившихся единично растущих деревьев. При обследовании поврежденных огнем насаждений учитывались характеристики жизнеспособной и погибшей части древостоев. Для жизнеспособной части приводились все показатели, предусмотренные лесостроительной инструкцией, а для погибшей части – процент поврежденных деревьев, степень их повреждения, а также породный состав погибшей части древостоя, возраст, средняя высота и запас древесины на 1 га.

Результаты исследований

Картографирование пройденных пожарами площадей. Оценка пройденных пожарами площадей (пожарищ) по спутниковым изображениям осуществлялась в два этапа. На первом этапе контур пожарища, выделенный по SPOT-VEGETATION, использовался для ее идентификации и «локализации» гистограммы распределения нормализованного разностного вегетационного индекса до и после пожара на изображениях высокого пространственного разрешения.

Второй этап включал коррекцию контура пожарища на основе анализа распределения индексов NDVI до и после пожара. Для получения разностных параметров использовались спутниковые изображения высокого разрешения Landsat-7/ETM+ и Метеор-3М/МСУ-Э (рис. 2а, б). На базе двух спектральных каналов, соответствующих красному и ближнему инфракрасному диапазонам спектра, для каждого изображения были вычислены значения нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI. Последующее формирование разностного изображения осуществлено процедурой простого вычитания значений NDVI в пикселах, соответствующих состоянию насаждения после пожара и до него (рис. 2в). С помощью технологии анализа спектральных сигнатур ERDAS Imagine, были получена локальная гистограмма распределения разности NDVI (рис. 2г).

В результате анализа гистограммы разностного изображения выделен диапазон значимых разностей NDVI $[-0.63; -0.08]$, соответствующих изменению спектральных характеристик в результате воздействия пожара. По этим данным выявлены участки насаждений, подвергшихся воздействию огня, и отобраны тестовые площадки, предназначенные для детальной оценки характеристик поврежденных древостоев. С помощью данной методики были обработаны 10 пар разновременных изображений Landsat-7 (ETM+) и Метеор-3м (МСУ-Э) и получены уточненные контуры пожарищ. Площадь приведенного в статье пожара (рис. 2д) после уточнения его границы по изображениям высокого пространственного разрешения составила 18033 га, что на 7% меньше площади по Spot-VEGETATION (19390 га).

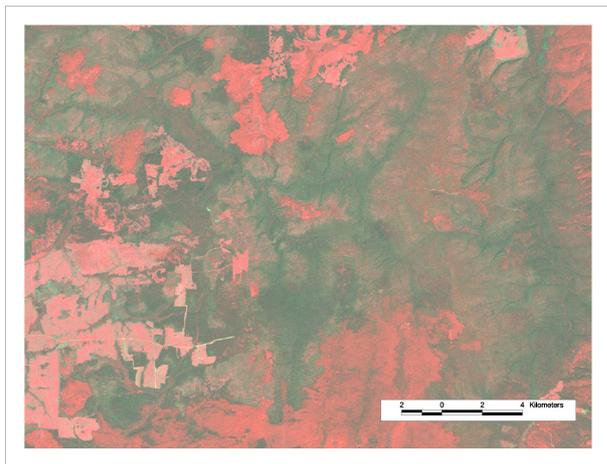
Сравнительный анализ. В рамках данного исследования использовались материалы двух тестовых пожарищ, образовавшихся в результате пожаров 1996 и 1997 годов в лесах Красноярского края в бассейне рек Бирюса-Ангара (пожарище №1) и на юго-востоке от города Красноярск (пожарище №2).

Результаты и методика регрессионного анализа, приведенные в научной работе [2], послужили основой для настоящих исследований. Независимо с помощью той же методики по данным спутниковых и наземных измерений (рис. 3а) была получена калибровочная функция для оценки степени повреждения лесов на пожарище №2. На рисунке 3б приводятся графические зависимости разностного вегетационного индекса до и после пожара и степени повреждения лесов, полученные на тестируемых пожарищах.

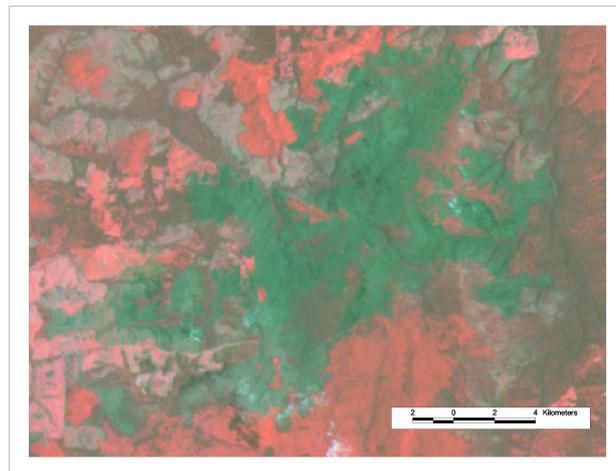
Калибровочные коэффициенты регрессионного уравнения первого тестового пожарища использовались для трансформации значений разностного изображения вегетационного индекса в степень повреждения лесного покрова на пожарище в окрестностях города Красноярска.

Сравнение значений степени повреждения, полученных разными оценками осуществлялось после вычисления разницы между двумя картами на основе анализа среднего квадратичного отклонения значений как на всем интервале от 0 до 100%, так и в границах пяти интервалов степени повреждения.

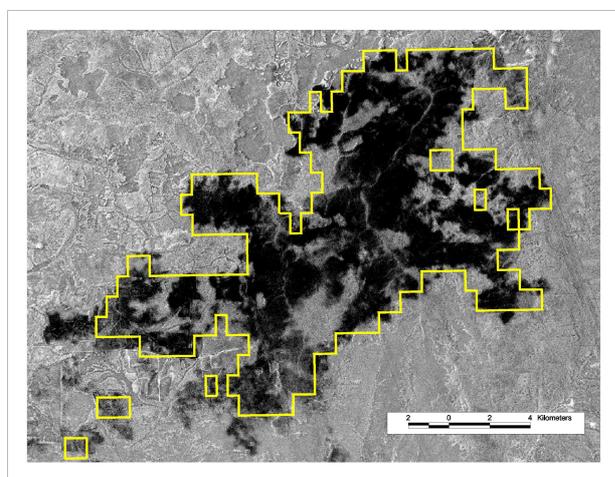
В среднем различие в оценках степени повреждения составляет 8,5 % при стандартном отклонении 2,6%. В табл. 1 приведены значения минимальных и максимальных, среднего и стандартного отклонения значений степени повреждения, полученных на основе разных калибровочных функций.



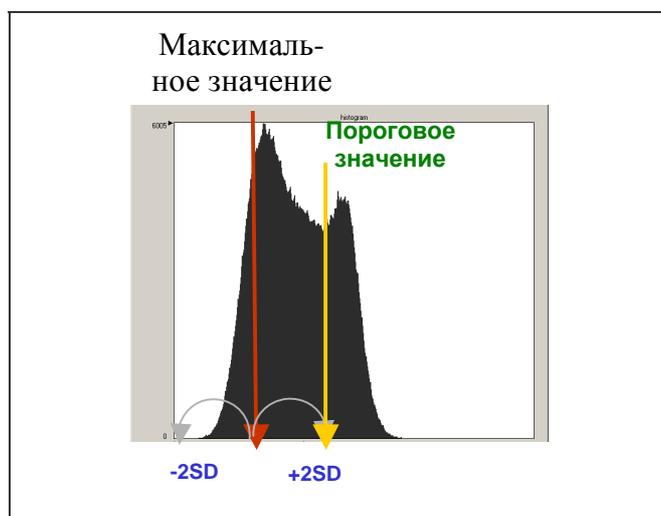
а) Landsat-7/ ETM+, 22.06.2000



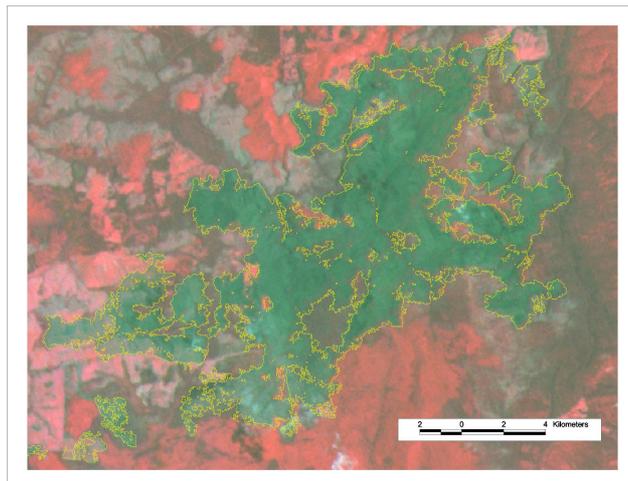
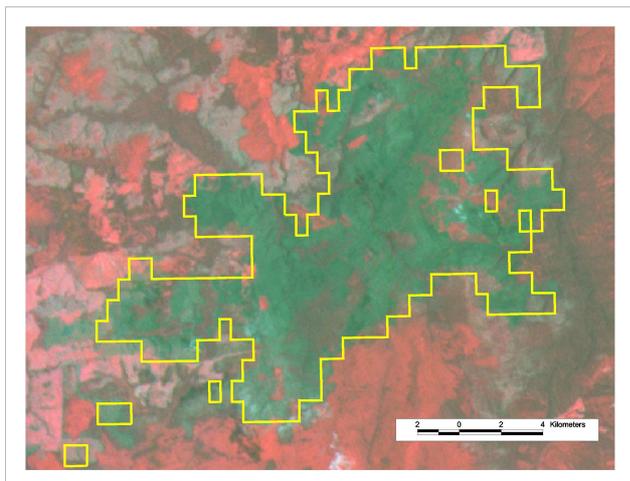
б) Метеор-3М / МСУ-Э, 21.06.2004



в) Область пожарища, выделенная по SPOT-Vegetation, на фоне разности NDVI



г) Гистограмма распределения значений $\Delta NDVI$ области пожарища



д) Контур гари до и после коррекции границы

Рис.2. Иллюстрация к методу коррекции контура пожарища по изображениям высокого пространственного разрешения

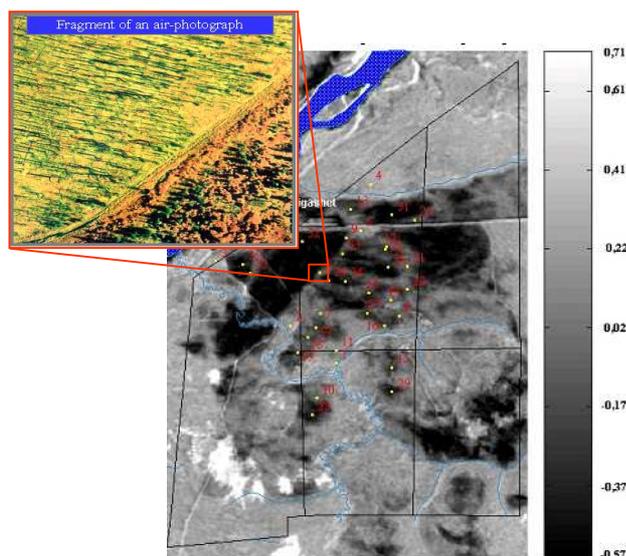
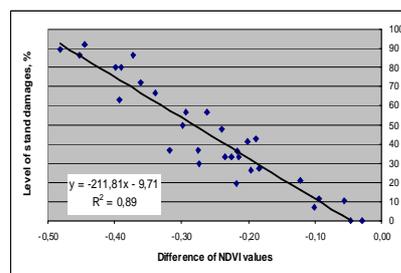
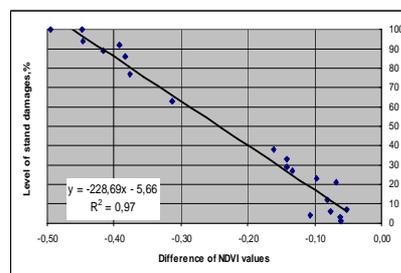


Рис.3а. Изображения разности NDVI с калибровочными площадками данных аэрофотосъемки для оценки степени повреждения лесов от пожара Усольского ЛХ



Усольский ЛХ, 1997



Манский ЛХ, 1998

Рис.3б. Регрессионная зависимость степени повреждения лесов от пожара и разности NDVI Усольского ЛХ и Манского ЛХ

Таблица 1. Статистические параметры отклонений в оценках степени повреждения

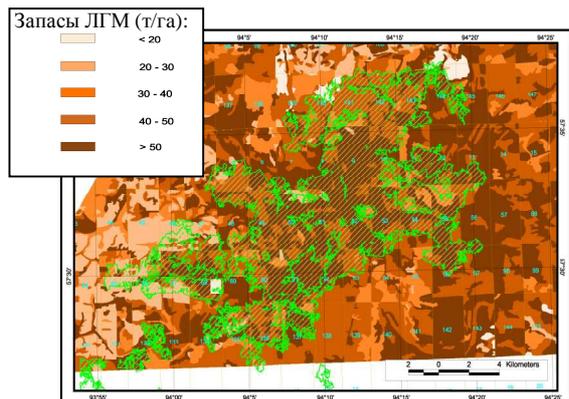
Степень повреждения	Величина отклонения в оценках степени повреждения, %			
	Минимум	Максимум	Среднее в классе	Дисперсия в классе
< 10%	1	6	4,0	1,5
11-30%	5	7	6,0	0,6
31-60%	6	9	7,9	0,7
61-80%	9	11	9,7	0,6
> 80%	10	19	11,5	0,8

Результаты сравнения двух оценок степени повреждения демонстрируют высокую сходимость результатов. Таким образом, можно сделать вывод о том, что оценка степени повреждения лесов на пожарных участках в пределах одной лесорастительной зоны и схожих типах лесов может быть получена с погрешностью в пределах 10-15 процентов. В рамках данного исследования были получены оценки степени повреждения лесной растительности для 10 тестовых пожарных участков, расположенных в Центральной части Красноярского края (леса Приангарья).

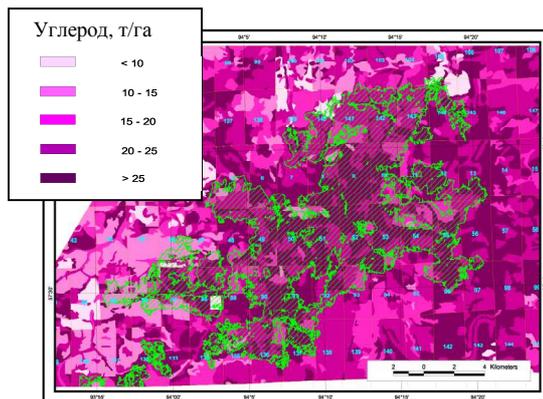
Оценка повреждений лесов от пожаров и пожарных эмиссий. Карта степени повреждения насаждений тестового пожарного участка, расположенного в Усольском лесхозе, использовалась для восстановления типа лесного пожара и интенсивности его горения. Для данной территории все необходимые материалы были доступны, включая спутниковые данные высокого разрешения до и после пожара, и базу данных инвентаризации лесов в формате ГИС. Методология оценки эмиссии, описанная в [2], включает три основных шага: (1) расчет лесных горючих материалов (ЛГМ); (2) восстановление типа и интенсивности пожара, используя степень повреждения огнем лесной растительности; (3) оценка расходов ЛГМ и количества углерода, выделяющегося в процессе горения.

Структура и запасы ЛГМ до пожара оценивались по данным инвентаризации лесов в границах выделов по таксационным характеристикам насаждений, а доля расходуемых ЛГМ при различных типах и интенсивностях горения – по экспериментальным данным.

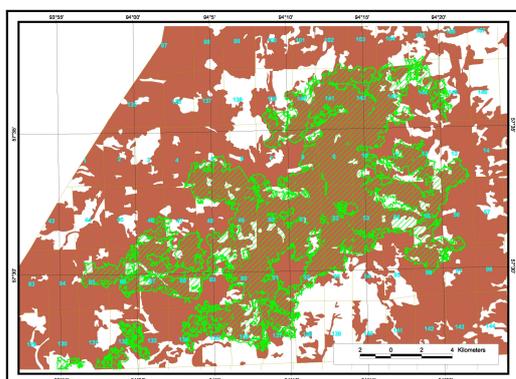
Тестовый участок – Усольский лесхоз, гарь 2004 года



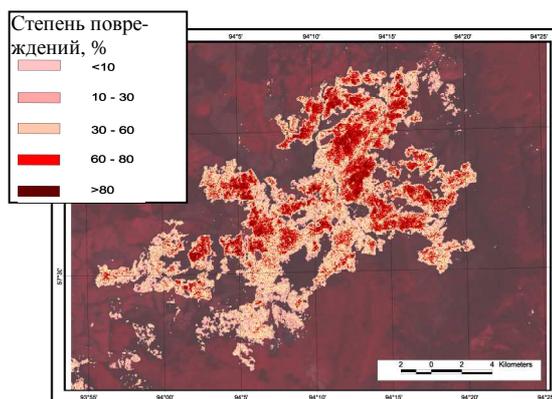
а) Запасы лесных горючих материалов до пожара по данным лесоинвентаризации



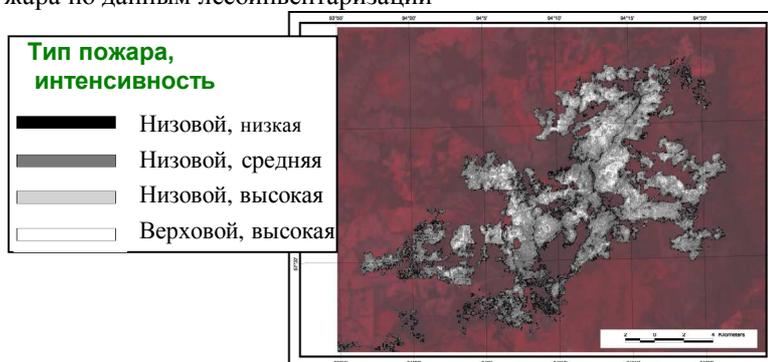
б) Запасы углерода до пожара, рассчитанные по данным лесоинвентаризации



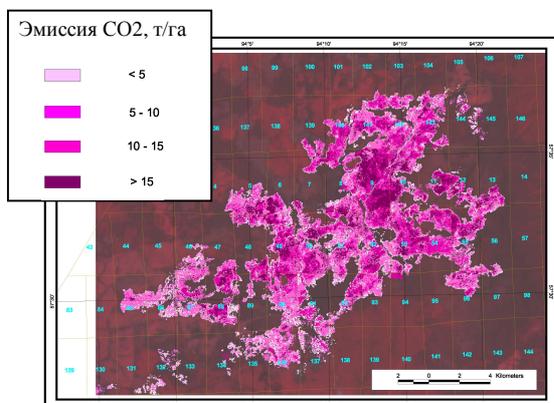
в) Зона возможного распространения верхового пожара по данным лесоинвентаризации



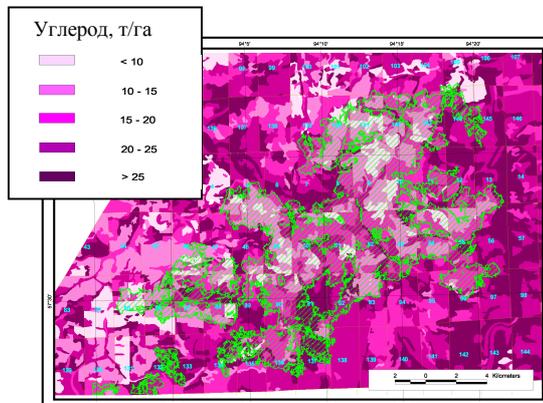
г) Степень повреждения насаждений от пожара



д) Тип пожара и его интенсивность



е) Эмиссия углерода в результате пожара



ж) Запасы углерода после пожара

Рис.4 Расчет эмиссии углерода (зеленым цветом выделен контур пожарища)

Расчет запасов ЛГМ до пожара был выполнен с учетом породно-возрастной и ярусной структуры древостоев для пяти различных топливных фракций по данным ГИС, по таблицам конверсионных коэффициентов для перехода от запасов древесины к массе воздушных ЛГМ и таблицам коэффициентов аллометрических уравнений для оценки массы ЛГМ в подросте и подлеске. Таким образом, была построена карта запасов ЛГМ (рис. 4а) и углерода до пожара (рис. 4б).

Проанализировав структуру ЛГМ и наличие проводников горения для верхового пожара, были выделены зоны вероятного распространения верхового огня (рис. 4в).

Восстановление характера и интенсивности пожара (рис. 4д) осуществлялось путем наложения двух карт: карты степени повреждения лесной растительности (рис. 4г) и карты зон возможного распространения верхового и низового горения. В результате 731,8 га (4 %) лесной области были повреждены верховым огнем, 4695,4 га (26 %) - низовым огнем высокой интенсивности, 8800,5 га (49 %) низовым огнем средней интенсивности, и 3805,4 га (21 %) – низовым огнем низкой интенсивности.

Масса сгорающих органических материалов на каждом пройденном огнем участке находится через запасы ЛГМ до пожара и долю расходуемых горючих материалов, как функция типа и интенсивности пожара. Интенсивность пожарных эмиссий углерода с каждого из пройденных огнем участков определяется как произведение массы сгоревших органических материалов на долю углерода в их составе.

Общая масса сгоревших органических материалов находится как сумма расходов ЛГМ по всем пройденным огнем участкам, а общая масса пожарных эмиссий – как произведение массы сгоревших органических материалов и доли углерода в их составе.

Результатом данного этапа работ являлась карта пожарных эмиссий углерода с 1 га пройденной огнем площади и суммарная величина эмиссии за период действия пожара. (Рис. 4е). Как результат полная эмиссия углерода от пройденного огня была оценена в 142261 тонн (табл. 2). Пространственное распределения запасов CO₂, сохранившегося в древесном пологе после пожара приводится на рис. 4ж.

Таблица 2. Распределение объемов пожарных эмиссий углерода по типам пожара и интенсивности его горения

Название лесничества	Эмиссия углерода по типам пожара и интенсивности его горения, тС				Σ
	Низовой низкой интенсивности	Низовой средней интенсивности	Низовой высокой интенсивности	Верховой пожар	
Шумихинское	265.27	6999.64	11944.61	0	19209.52
Троицкое	1567.04	51980.56	52316.73	17187.19	123051.5
Σ	1832,31	58980,20	64261,34	17187,19	142261,02

Заключение

Проведенные исследования позволили разработать методы картографирования площадей пожаров и оценки степени повреждения огнем лесных насаждений на основе комплексного использования данных спутниковых систем высокого и низкого пространственного разрешения и выборочных наземных измерений. Экспериментально изучена возможность применения метода оценки степени повреждения лесов на пожарищах, расположенных в однородных лесорастительных условиях. Экспериментально апробирован алгоритм оценки пожарной эмиссии углерода, базирующиеся на данных дистанционного зондирования лесов и материалов лесоустройства.

Выполненные исследования подтвердили правильность принятых теоретических предположений. Установлено, что калибровочная функция взаимосвязи изменения NDVI со степенью повреждения древостоя для разных тестовых пожарищ близка к линейной, а коэффициенты линейной корреляции достаточно высоки ($R^2=0.89$ и $R^2=0.97$). Отмечен хороший уровень согласованности

результатов оценок степени повреждения, полученных с помощью двух разных калибровочных функций для одного тестового пожара. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования методики оценки пожарных эмиссий углерода при наличии материалов лесоустройства, спутниковых изображений и выборочных наземных измерений степени повреждения лесов.

Предложенные методы могут найти применение при создании базы данных для валидации национальных систем оценки антропогенных выбросов парниковых газов, предусмотренных Киотским протоколом к Конвенции об изменении климата.

Работа выполнялась при поддержке Европейского космического агентства в рамках проекта GMES Networking with Russia and Ukraine 2004: «Forest Ecosystem Monitoring in Northern Eurasia» (FEMINE).

Литература

1. *Isaev A., Korovin G. et al.* Carbon stock and deposition in phytomass of the Russian forests // *Water, Air and Soil Pollution*, Volume 82-1995, p.247-256.
2. *A.S. Isaev, G.N.Korovin, S.A.Bartalev, D.V.Erchoy, A.Janetos, E.S.Kasischke, H.H.Shugart, N.H.F.French, B.E.Orlick, T.L.Murphy.* Using Remote Sensing to Assess Russian Forest Fire Carbon Emissions. // *Climatic Change* 55: 235-249, 2002.
3. *Егоров В.А., Барталев С.А.* Анализ временных серий спутниковых данных Spot-Vegetation для мониторинга повреждений пожарами бореальных экосистем // Сборник научных статей Второй открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса», Институт космических исследований РАН, Москва, GRANP polygraph, 2005, том 2, с.380-387.
4. *Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Уваров И.А.* Оценка площадей повреждений наземных экосистем Северной Евразии пожарами в 2000-2003 годах по спутниковым данным инструмента Spot-Vegetation // Сборник научных статей Второй открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса», Институт космических исследований РАН, Москва, GRANP polygraph, 2005, том 2, с.354-366.
5. *Уткин А.И., Гульбе Т.А и др.* Биопродуктивность лесных экосистем. Компьютерная база данных. // Институт лесоведения РАН, ЦЭПЛ РАН, Москва, 1994.
6. *Загребев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалева А.Г.* Общесоюзные нормативы для таксации лесов. // Москва, Колос, 1992, 495 С.
7. *Уткин А.И., Замолотчиков Д.Г. и др.* Определение запасов углерода насаждений на пробных площадях: сравнение аллометрического и конверсионно-объемного методов// «Лесоведение» № 5, 1997, с.51-66.