

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ЭМИССИИ ОКИСИ УГЛЕРОДА ЛЕТОМ 2010 г. В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ СРЕДНЕРУССКОЙ РАВНИНЫ И ОЦЕНКА ИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ КАРТ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

© 2012 г. А. Н. Сафронов^{1*}, Е. В. Фокеева¹, В. С. Ракитин¹, Л. Н. Юрганов², Е. И. Гречко¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы
им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва

² Объединенный центр Земной системной технологии, Мерилендский университет Балтимора, США

*E-mail: safronov_2003@mail.ru

Работа посвящена оценке эмиссий окиси углерода (СО) во время пожаров аномально жаркого лета 2010 г. в центральной части Среднерусской равнины. Приводятся оценки эмиссий от лесных пожаров, полученные с использованием методик “Active Fires” (продукт MODIS – MCD14ML) и “Burned Areas” (продукт MODIS – MCD45) для карт растительности AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover, MCD12Q1. Проведены сравнение карт растительности и исследование изменений структуры состава лесов за период 2005–2009 гг. Показано, что основную неопределенность в оценку эмиссии СО дают в порядке убывания: различия в методиках подсчета эмиссий, различия в используемых картах растительности, различия в данных спутников Terra и Aqua, учет динамики изменения структуры лесов. Дополнительно для сравнения приводятся оценки эмиссий, полученные независимым методом с использованием орбитальных (MOPITT, AIRS, IASI) и наземных (Москва, Звенигород) спектроскопических измерений содержания СО.

Ключевые слова: лесные и торфяные пожары, окись углерода, карты растительности, спутниковые методы, спектроскопические измерения, моделирование переноса примесей, оценка эмиссий, Среднерусская равнина

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, изменения растительного покрова оказывают существенное воздействие на состав атмосферы посредством изменения ее свойств, как химических, так и физических, а также за счет сопутствующих химических процессов, происходящих в почвах и в биосфере (Seinfeld, Pandis, 2006). При лесных и степных пожарах в атмосферу попадает определенное количество различных газов СО, СО₂, VOC (Volatile organic compounds), СН₄, NO_x, NH₃, SO₂ и аэрозолей PM₁₀, PM_{2.5} (Wiedinmyer et al., 2006). Эмиссии от природных пожаров сильно зависят от типа сжигаемой растительности. Достоверные сведения о растительном покрове и его изменении являются ключевыми для физики и химии атмосферы при формировании различных эмиссионных сценариев.

Летом 2010 г. территория почти всей европейской части России находилась под воздействием блокирующего антициклона необычайной протяженности и длительности. На фоне повышенных температур и малого количества осадков сложилась пожароопасная обстановка, которая привела к сильным природным пожарам, и, как следствие, к экстремально высоким уровням загрязнения атмосферы в Москве и многих других населенных пунктах. Концентрации вредных при-

месей, в частности, окиси углерода (СО), достигали значений, в несколько раз превосходящих ПДК. Это стало отправной точкой нашего исследования.

В предыдущих наших работах, посвященных изучению загрязнения атмосферы в этот период, нами были предприняты попытки оценки мощности эмиссий от пожаров. Применение различных методик приводило к различию оценок, полученных не только нами, но и другими авторами. Попробуем изложить свои соображения по поводу причин возникновения тех неопределенностей эмиссионных оценок, с которыми нам пришлось столкнуться.

Как известно, использование спутниковых средств и методов дистанционного зондирования (ДЗ) для исследования наземных экосистем дает возможность охватывать большие территории и оценивать масштабы изменений в лесах и других типах растительного покрова. Обзор достижений спутниковых технологий для мониторинга растительности, в частности для мониторинга состояния лесов России, можно найти в работах (Барталев и др., 2006, 2010; Бондур, 2010; Галеев и др., 2008; Егоров и др., 2008; Уваров и др., 2006).

Сопоставлению различных карт растительности, использующихся в данной статье, посвящены многие работы, начиная с работ (Hansen et al.,

2000), в которой проводилось сравнение карт растительности AVHRR/UDM и GLCC для одного сенсора AVHRR/NOAA. Указанной тематики в той или иной степени касаются работы (Foody, 2002; Giri et al., 2005; Iwao et al., 2006; Jung et al., 2006; Mayaux et al., 2006; McCallum et al., 2006; See et al., 2006; Fritz et al., 2009; Iwao et al., 2011) и многие др.

Цель данной работы – уточнение мощности эмиссии CO, связанное с использованием различных карт растительности. Для сравнения карт растительности, используемых при оценке пожарных эмиссий, в работе было проведено сравнение фракций, занятых различными типами лесов. Отметим, что карты растительности, используемые различными авторскими коллективами, получены на основе космических снимков не на момент регистрации пожаров. Следовательно, динамика изменения растительности также вносит неточность в оценку эмиссий (как биогенных, так и пожарных). Поэтому дополнительно проведены исследования динамики лесов на основе имеющихся спутниковых карт экосистем 2005–2009 гг.

Кроме того, в работе используются данные наземных и спутниковых измерений полного содержания CO в столбе атмосферы, полученные для упомянутого периода на территорию Московского региона. На основе этих данных произведена валидация спутниковых измерений, а также (еще одним, независимым, методом) получены оценки мощности эмиссий CO от пожаров (Yurganov et al., 2011; Фокеева и др., 2011). Подобная валидация проводится Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА) практически с самого начала работы космических сенсоров MOPITT и AIRS (Yurganov et al., 2010).

Отметим, что ряд работ, посвященных исследованию состояния атмосферы летом 2010 г. в Московском регионе, уже опубликован или находится в состоянии публичного обсуждения, см. (Еланский и др., 2011; Фокеева и др., 2011; Kaiser et al., 2011; Kononov et al., 2011; Witte et al., 2011; Yurganov et al., 2011). Методики измерения газовых примесей и точность измерения концентраций примесных газов в мегаполисе г. Москва, в частности CO на станциях ИФА и с помощью передвижной лаборатории TROICA, приведены в работе (Еланский и др., 2010). Спектроскопическая методика измерений полного содержания CO в вертикальном столбе атмосферы, с помощью которой проводятся измерения в Москве (ИФА) и Звенигороде (Звенигородская научная станция ИФА, далее ЗНС), описана в работах (Dianov-Klokov et al., 1989; Yurganov et al., 2002; Фокеева и др., 2011).

В настоящей работе в рассмотрение были включены следующие территории Центрального федерального округа, из которых происходил вы-

нос основной части примеси на мегаполис: Московская, Тверская, Рязанская, Липецкая, Калужская, Нижегородская, Тульская, Владимирская, Ярославская, Ивановская, Орловская, Смоленская, Пензенская, Тамбовская области и республика Мордовия (см. рис. 1 на цветн. вклейках).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе при оценке эмиссий использовались следующие готовые карты растительности, созданные на основе спутниковых измерений:

- карта растительности UDM, сенсор AVHRR спутника NOAA (1993–1994 гг.), 13-категорий;
- карта растительности GLC-2000, сенсор VGN спутника SPOT-4 (2000 г.), 22-категории;
- карта растительности GlobCover-2005 и GlobCover-2009, сенсор MERIS спутника Envisat (2005 и 2009 гг., соответственно), 22-категории;
- карты растительности IGBP (продукт MCD12Q1), сенсор MODIS спутников Terra и Aqua (2005–2009 гг.), 17-категорий.

Поскольку в работе использовались только готовые карты растительности, сопоставления со снимками Landsat TM/ETM+/SPOT-4 HRVIR не производились.

Ниже приведены основные параметры карт растительности, используемые при расчетах эмиссий.

Классификация растительности AVHRR/UDM

Радиометр AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) устанавливается на борту метеорологических спутников NOAA (National Oceanic and Atmospheric Agency). Сенсор AVHRR/NOAA имеет пять основных спектральных каналов: канал 1 – видимый – VIS (0.58–0.68 мкм), канал 2 – ближний инфракрасный (ИК) – NIR (near infrared, 0.725–1.1 мкм), канал 3 – тепловой ИК – TIR (thermal infrared, 3.55–3.93 мкм), канал 4 – тепловой (thermal, 10.3–11.3 мкм), канал 5 – тепловой (thermal, 11.5–12.5 мкм). Пространственное разрешение AVHRR/NOAA равно 1100 м в надири, полуса обзора составляет 2399 км.

Для исследования растительного покрова использовались данные NDVI, полученные AVHRR/NOAA за период с 1 апреля 1992 г. по 30 сентября 1993 г. Широкое распространение получили карты наземных экосистем, созданные по данным сенсора AVHRR в рамках проектов International Geosphere Biosphere Programme (IGBP) (Loveland et al., 1999, 2000) и университета Мэриленд UDM (Hansen et al., 2000; Hansen, Reed, 2000; Sukhinin et al., 2004). В настоящей работе использовалось покрытие AVHRR/UDM 1 км, данные взяты с сайта <http://glcfapp.glc.umd.edu:8080/esdi/ftp?id=12531>.

Карта растительности Global Land Cover-2000

Проект Global Land Cover 2000 (GLC-2000) был выполнен европейским сообществом (1999–2002 гг.) на основе данных спутника SPOT-4. Установленный на SPOT-4 широкоугольный датчик низкого разрешения VGN имел четыре камеры, каждая из которых работала в определенном спектральном интервале и покрывала общее поле видимости. Спектральные линии для камер VGN были следующими: в видимом диапазоне Green/B1 (0.50–0.59 мкм), Red/B2 (0.61–0.68 мкм), в ближнем ИК-диапазоне NIR/B3 (0.78–0.89 мкм) и ИК-диапазоне MIR/B4 (1.58–1.75 мкм). Оптимальный размер пиксела для камер низкого разрешения VGN равен 1.165×1.165 км.

Расчет покрытия для GLC-2000 производился по отношению каналов NIR/RED и NIR/MIR для отдельных S-10 SPOT-4/VGN снимков в отсутствии снежного покрова и облачности. Карта растительности составлена на основе космических снимков, полученных с 01.01.2000 г. по 31.12.2000 г. Район, охваченный пожарами летом 2010 г., попадает сразу в несколько наборов: Europe (регион 8, v2.0), Northern Eurasia (регион 3, v4.0) и в глобальный набор Global Product (v1.1) (Bartalev et al., 2003; Bartholomé, Belward, 2005; Global Land Cover..., 2003).

Пример использования карты растительности GLC-2000 с 22-мя категориями растительности приведен на рис. 1. На рисунке дополнительно отмечены торфяники по данным (Stolbovoi, Savin, 2002). Расшифровка легенды растительности, показанной на рисунке под номерами 1–22, приведена в (Global Land Cover..., 2003). Числами s1–s6 обозначены основные очаги (подземных) торфяных пожаров, (см. Фокеева и др., 2011).

Классификация растительности по Global Land Cover-2000

Установленный на спутнике ENVISAT спектрометр MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument) регистрирует солнечную радиацию, отраженную от поверхности Земли в 15 полосах с длинами волн от 412.5 нм до 900 нм. Спектрометр MERIS способен давать разрешение снимков поверхности Земли в двух диапазонах: с детальным разрешением (FR – Full spatial Resolution) и панорамные снимки (RR – Reduced spatial Resolution). Снимки с разрешением FR и RR имеют пространственное разрешение 290×260 и 1200×1400 м соответственно вдоль и поперек траектории спутника.

Данные FR/MERIS были обработаны и обобщены в нескольких картах покрытия земной поверхности различными типами растительности. Подробнее см. описание на сайте (<http://envisat.esa.int/handbooks/>). В частности, были получены глобальные покрытия Globcover Land Cover v2.2 и

v2.3 (далее GlobCover-2005 и GlobCover-2009 соответственно). Первое покрытие, захватывающее период с декабря 2004 г. по июнь 2006 г., имело 23 категории растительности, второе покрытие было получено на основе данных с января 2009 г. по декабрь 2009 г. и имело 21 категорию.

Классификация растительности по MCD12Q1

Карта растительности создана с использованием спутниковых данных MODIS/Terra и MODIS/Aqua. На настоящий момент карта растительности MCD12Q1 представлена коллекцией № 5 (V005 Land Cover Type). Имеет пространственное разрешение 500 м в отличие от коллекции № 4 (MOD12Q1, V004 Land Cover Type), имевшей разрешение 1000 м. В наборе данных MCD12Q1 представлены четыре типа классификации растительности: IGBP (Type 1), UMD (Type 2), LAI/fPAR (Type 3), NPP (Type 4).

В работе используется классификация IGBP, имеющая 17 категорий растительности. Отметим, что набор данных MCD12Q1 недостаточно хорошо документирован, в литературе чаще всего встречаются ссылки на набор MOD12Q1, V004 (Friedl et al., 2002).

СРАВНЕНИЕ КАРТ РАСТИТЕЛЬНОСТИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ РАСЧЕТАХ ПОЖАРНЫХ ЭМИССИЙ

Сопоставление площади лесов по различным картам растительности

Следует выделить два принципиально отличающихся подхода к формированию карт растительности: первый подход, применяемый в Национальном агентстве США по авионавигации и изучению космического пространства (NASA), второй подход – Европейского космического агентства (ESA).

На рис. 2 представлены общая площадь лесов, а также площади хвойных, широколиственных и смешанных лесов исследуемого региона по данным карт растительности UDM/AVHRR/NOAA, GLC-2000/VGN/SPOT-4, GlobCover-2005/2009 MERIS/Envisat и MCD12Q1/MODIS/Terra/Aqua в исследуемом регионе.

Как видно из рис. 2, все карты растительности GLC-2000, GlobCover-2005/2009 и MCD12Q1 (2001–2009) дают общее количество лесов в интервале 35–45% от территории регионов. Исключение составляет карта растительности AVHRR/UDM, которая занижает общую площадь лесов и дает значение 21.27%.

Из рис. 2 видно, насколько по-разному трактуют различные группы исследователей понятия хвойных, широколиственных и смешанных лесов. Имеется некоторое сходство между хвойными категориями GlobCover и MCD12Q1 (менее 2.6%), при этом

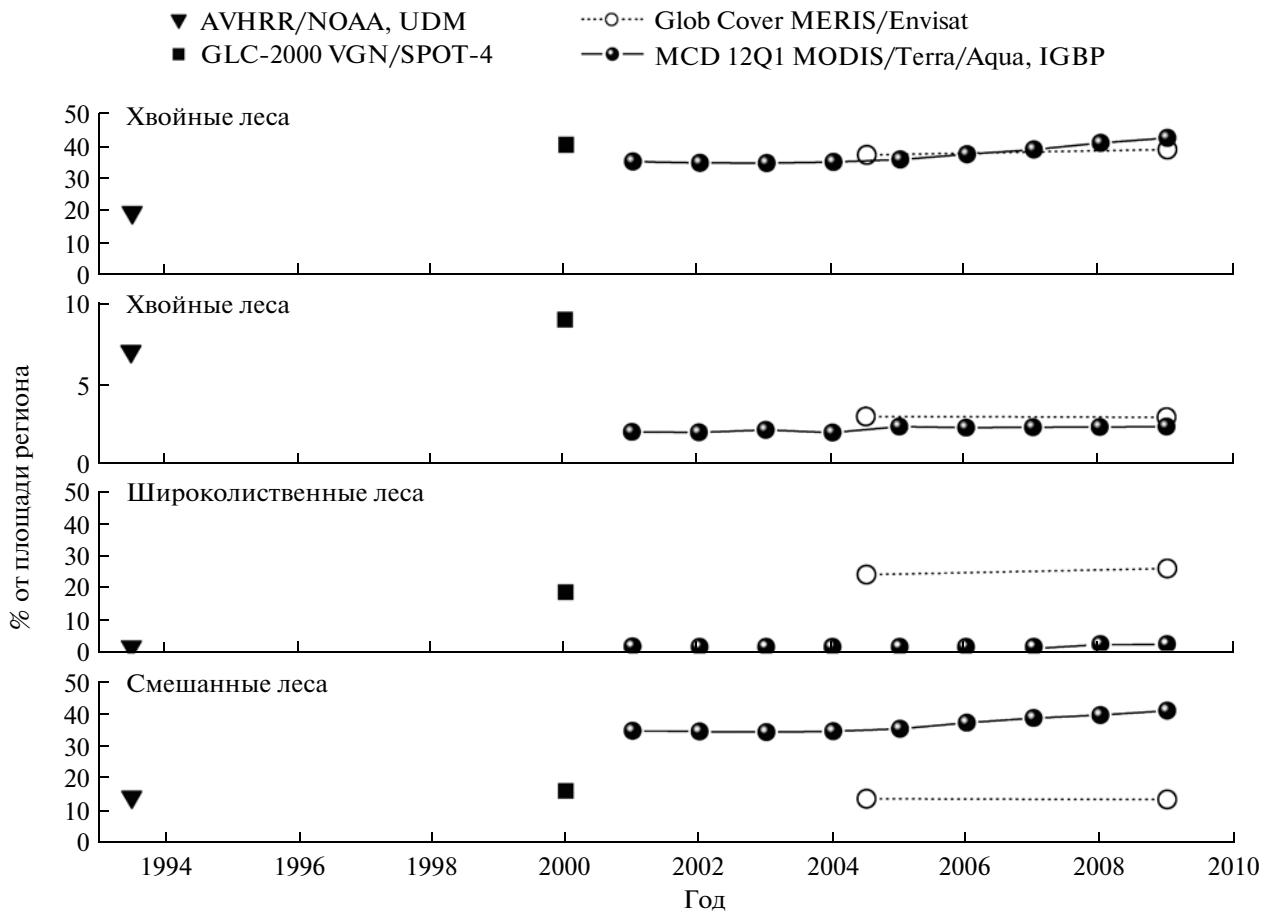


Рис. 2. Общая площадь лесов и площадь хвойных, широколиственных и смешанных лесов центральной части средне-русской равнины по данным карт растительности AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover и MCD12Q1/IGBP в процентах от площади региона.

карты растительности AVHRR/UDM и GLC-2000 дают площадь хвойных лесов 6.61 и 8.6% соответственно.

Для широколиственных лесов карты AVHRR/UDM и MCD12Q1 дают значения предельно малые, менее 2.5%, в то время как по GLC-2000 площадь широколиственных лесов в 2000 г. была 18.46% и, по данным GlobCover-2005/2009, изменялась в пределах 23.92–25.81%.

Смешанные леса, по данным карт AVHRR/UDM, GLC-2000 и GlobCover-2005/2009, составляют порядка 12–14% от площади региона, в то время как, по данным MCD12Q1, площадь смешанных лесов возрастает с 32.74 до 40.05%.

Категории растительности, отвечающие за лесной покров, полученные на основе анализа спутниковых снимков, определяются достаточно точно. В основном неточность в идентификации типа растительности определяется не столько приборными ошибками отдельных спектрометров, установленными на спутниках, сколько отличием методик в определении типа растительности, применяемыми различными исследовательскими коллективами.

Резюмируя изложенное выше, можно утверждать, что предпочтение тех или иных карт растительности будет приводить к значительной неопределенности при расчетах эмиссий.

Динамика изменения структуры лесов

Как уже отмечалось выше, динамика изменения структуры растительности также влияет на точность оценки пожарных эмиссий из-за того, что часто в расчетах используются карты растительности, составленные в предшествующие пожарам годы. Для того чтобы оценить неопределенность пожарных эмиссий из-за динамики растительности, надо сначала ответить на вопрос, насколько изменяется сама растительность. Для оценки динамики растительности выбраны карты растительности GlobCover (ESA) и MCD12Q1 (NASA) за период изменений с 2005 по 2009 гг.

В табл. 1–4 приведены данные (в процентах от площади областей, входящих в рассматриваемый регион) по изменению структуры лесов в центральной части средне-русской равнины. Для улучшения восприятия данных табл. 1–4 сорти-

Таблица 1. Общая площадь лесов в процентах от площади региона. Карта растительности GlobCover (категории – 50, 70, 100) и MCD12Q1 (категории – IGBP 1, 4 и 5)

Регион	GlobCover			MCD12Q1/IGBP		
	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год
Владимирская обл.	63.70	44.51	–4.80	53.53	62.87	2.14
Тверская обл.	59.19	61.71	0.63	65.24	73.57	1.95
Ярославская обл.	56.23	62.11	1.47	55.56	63.55	1.76
Ивановская обл.	52.95	52.92	–0.01	46.76	58.40	2.62
Нижегородская обл.	46.14	45.09	–0.26	48.85	55.95	1.62
Московская обл.	44.20	46.54	0.59	46.56	55.56	2.08
Смоленская обл.	40.04	56.43	4.10	39.48	50.48	2.72
Калужская обл.	37.67	63.19	6.38	40.55	49.31	2.16
Рязанская обл.	31.15	20.24	–2.73	23.87	27.70	0.87
Мордовская респ.	28.67	28.26	–0.10	22.44	26.53	1.01
Пензенская обл.	22.94	15.90	–1.76	12.66	17.43	1.19
Тамбовская обл.	14.22	9.73	–1.12	8.89	10.10	0.29
Тульская обл.	8.41	18.78	2.59	6.22	8.38	0.54
Орловская обл.	8.15	13.25	1.27	2.25	3.03	0.19
Липецкая обл.	7.68	9.17	0.37	4.45	5.17	0.17
Москва	4.66	8.29	0.91	15.03	17.67	0.58
Все регионы	39.00	40.67	0.42	37.57	44.23	1.56

ровка проводилась по первой колонке, в порядке убывания.

В табл. 1 приведены значения общей площади лесов и динамика ее изменения в % от площади областей за период 2005–2009 гг.

По данным GlobCover, в ряде северных областей в период 2005–2009 гг. происходило быстрое увеличение количества лесов, в то время как в южных областях Центрального федерального округа бурного роста лесов не отмечено (табл. 1).

В отличие от GlobCover, карта растительности MCD12Q1/IGBP показывает увеличение общей площади лесов во всех областях. Из сравнения карт GlobCover и MCD12Q1/IGBP видно, что для отдельных областей различаются не только абсолютные значения, но не совпадают и тенденции изменения общей фракции лесов. Так, например, во Владимирской области по данным GlobCover наблюдается катастрофическое падение площади лесов (–4.8%), в то время как по данным MCD12Q1/IGBP наблюдается бурный рост лесов (2.14%).

Отметим, что коэффициенты корреляции R между общей площадью лесов по картам GlobCover и MCD12Q1/IGBP высоки и составили 0.96 и 0.93 для 2005 и 2009 гг. соответственно (см. рис. 3). Стандартные отклонения SD между двумя картами растительности были равны 5.77 (2005 г.) и 9.07 (2009 г.). Коэффициенты линейной регрессии B

были близки к 1, и составили 0.95 в 2005 г. и 1.06 в 2009 г.

В работе также проводилась оценка динамики изменения хвойных, широколиственных и смешанных лесов. Статистические данные по хвойным лесам приведены в табл. 2. Из сопоставления карт растительности нельзя сделать однозначный вывод об уменьшении площадей, занятых хвойными лесами.

Отметим, что коэффициенты корреляции R между площадью хвойных лесов по картам GlobCover и MCD12Q1/IGBP невысоки и составляют 0.69 (2005 г.) и 0.63 (2009 г.). Стандартные отклонения SD между двумя картами растительности были равны 1.15 (2005 г.) и 1.37 (2009 г.). Коэффициенты линейной регрессии B были близки к 0.5 и составили: 0.49 (2005 г.) и 0.56 (2009 г.).

Изменение сплошных широколиственных лесов и смешанных лесов представлено в табл. 3 и 4.

Как уже отмечалось, различные исследователи по-разному трактуют понятие широколиственных и смешанных лесов (см. рис. 1). Так, AVHRR/UDM и MCD12Q1/IGBP классификации NASA практически не регистрируют широколиственные леса средней полосы (UDM, IGBP класс 4), перенося эти леса в категорию смешанных лесов (класс 5). При этом европейская классификация по спутниковым данным ESA достаточно устойчиво выделяет категории широколиственных и смешанных лесов Среднерусской

Таблица 2. Площадь хвойных лесов в процентах от площади региона. Карты растительности GlobCover (категория – 70) и MCD12Q1 (категория IGBP-1)

Регион	GlobCover			MCD12Q1/IGBP		
	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год
Московская обл.	11.31	11.50	0.05	3.69	5.27	0.39
Владимирская обл.	6.07	3.32	-0.69	3.90	3.72	-0.05
Ивановская обл.	2.82	1.69	-0.28	1.63	1.62	0.00
Рязанская обл.	2.76	1.27	-0.37	1.65	1.55	-0.03
Москва	2.72	3.43	0.18	1.91	4.38	0.62
Тверская обл.	2.23	1.94	-0.07	4.11	3.97	-0.04
Ярославская обл.	2.12	1.79	-0.08	0.81	0.90	0.02
Мордовская респ.	1.85	1.72	-0.03	1.02	0.57	-0.11
Нижегородская обл.	1.83	1.00	-0.21	3.34	2.62	-0.18
Калужская обл.	1.78	4.02	0.56	0.27	0.63	0.09
Смоленская обл.	1.35	2.26	0.23	0.28	0.39	0.03
Пензенская обл.	0.55	0.72	0.04	0.49	0.46	-0.01
Липецкая обл.	0.42	1.29	0.22	0.66	0.59	-0.02
Тамбовская обл.	0.35	1.41	0.26	0.31	0.17	-0.03
Орловская обл.	0.11	1.97	0.46	0.04	0.04	0.00
Тульская обл.	0.03	1.06	0.26	0.03	0.13	0.03
Все регионы	2.56	2.52	-0.01	1.93	1.94	0.00

равнины (см. GLC и GlobCover на рис. 2). В такой ситуации сопоставление карт растительности GlobCover и MCD12Q1/IGBP для сплошных широколиственных лесов и смешанных лесов теряет всякий смысл.

По этой причине динамику изменения лесов приведем только по GlobCover. Динамика широколиственных лесов не однозначна: так, в северных областях (Калужской, Смоленской, Тверской и Ярославской) наблюдается быстрый рост широколиственных лесов. В южных областях рост широколиственных лесов отмечен только в Тульской области. Предположительно быстрый рост широколиственных лесов происходит в результате роста березняка на заброшенных пахотных землях и лугах (более подробно см. табл. 3).

Отметим, что коэффициенты корреляции R между площадью смешанных лесов по картам GlobCover и MCD12Q1/IGBP высоки и составляют 0.93 (2005 г.) и 0.97 (2009 г.). Стандартные отклонения SD между двумя картами растительности были равны 8.20 (2005 г.) и 5.50 (2009 г.). Коэффициенты линейной регрессии B были 2.5 (2005 г.) и 3.1 (2009 г.).

Динамика изменений площади населенных пунктов и пахотных угодий напрямую не связана с динамикой изменения структуры лесов. В то же время отметим, что изменения площадей населенных пунктов и пахотных угодий являются социально значимыми. В табл. 5 приведена динамика

изменений площади населенных пунктов и пахотных угодий по данным GlobCover. Так как площадь населенных пунктов и городов существенно меньше общей площади региона, то для наглядности изменение площади городов и населенных пунктов выражено в процентах от площади, занимаемой городами и населенными пунктами в 2005 г.

Площадь городов и поселений (GlobCover – 190 категория) практически повсеместно уменьшается, в том числе и в тех областях, где в период 2005–2009 гг. бурно развивалось сельское хозяйство. В ряде южных областей наблюдается резкий рост площади пахотных земель за счет уменьшения 30-, 110- и частично 20-й категорий GlobCover, проще говоря, за счет возврата в оборот бывших пахотных угодий. В северных областях отмечается предельно низкий уровень развития сельского хозяйства, при этом пахотные угодья занимают <10% от площади региона (см. табл. 5), наблюдается их быстрая деградация.

Отметим, что параметры корреляции между площадью пахотных земель по картам GlobCover и MCD12Q1/IGBP составляют ($B = 3.2$, $R = 0.78$, $SD = 19.97$) для 2005 г. и ($B = 2.0$, $R = 0.98$, $SD = 5.95$) для 2009 г.

Параметры корреляции между площадью населенных пунктов по картам GlobCover и MCD12Q1/IGBP составляют ($B = 0.98$, $R = 0.99$,

Таблица 3. Площадь широколиственных лесов в процентах от площади региона. Карты растительности GlobCover, (категория – 50) и MCD12Q1, (категория IGBP-4)

Регион	GlobCover			MCD12Q1/IGBP		
	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год
Ярославская обл.	35.30	42.24	1.73	0.37	1.77	0.35
Ивановская обл.	31.77	32.06	0.07	0.13	0.51	0.09
Тверская обл.	31.72	40.05	2.08	0.56	1.65	0.27
Владимирская обл.	31.02	19.87	–2.79	0.28	0.71	0.11
Нижегородская обл.	30.85	31.20	0.09	0.89	0.90	0.00
Смоленская обл.	30.42	41.05	2.66	2.51	5.94	0.86
Калужская обл.	24.86	41.55	4.17	1.46	3.85	0.60
Мордовская респ.	20.81	19.68	–0.28	3.20	3.42	0.05
Пензенская обл.	20.50	11.85	–2.16	4.62	6.31	0.42
Рязанская обл.	18.27	11.90	–1.59	1.57	1.72	0.04
Московская обл.	17.72	16.84	–0.22	0.49	0.90	0.10
Тамбовская обл.	10.38	4.95	–1.36	0.94	1.47	0.13
Тульская обл.	8.26	16.63	2.09	1.56	2.33	0.19
Орловская обл.	7.56	10.04	0.62	0.46	0.86	0.10
Липецкая обл.	5.59	5.82	0.06	0.57	0.90	0.08
Москва	1.21	0.98	–0.06		0.12	0.03
Все регионы	23.92	25.81	0.47	1.29	2.24	0.24

$SD = 0.18$) для 2005 г. и ($B = 0.99$, $R = 0.99$, $SD = 0.14$) для 2009 г.

В целом в заключение всего этого раздела следует отметить, что основная причина описанных нами неопределенностей и разночтений обусловлена различиями в подходах NASA и ESA к составлению карт растительности. Также анализ показал, что изменения растительности за период с 2005 по 2009 гг. значительно меньше, чем отличия в схожих категориях растительности для разных карт (см. коэффициенты корреляции).

ОЦЕНКА ЭМИССИЙ ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Как уже отмечалось выше, эмиссии при пожарах сильно зависят от типа сгоревшей растительности. Наибольший вклад в эмиссии при одинаковой площади возгорания дают лесные пожары, так как в лесах значительно выше плотность растительности. Представляется интересным использовать полученные выше разные карты растительности для оценки ошибки при определении эмиссий от лесных пожаров.

Непосредственно для оценки пожарных эмиссий использовалась типичная методика расчета (Wiedinmyer et al., 2006). Расчет эмиссии i -примеси (частной эмиссии) производился по общей формуле

$$Emission_i = A B C E e_i,$$

где: A – площадь пожара; B – площадь растительности, $кг/м^2$; CE – фракция сгоревшей при пожаре биомассы; e_i – эмиссия i примеси на $кг$ сгоревшей биомассы, $г/кг$.

В работе (Wiedinmyer et al., 2006) расчет производился для набора карт растительности GLC-2000 North America, имеющего 29 категорий растительности. Напомним, что используемая в настоящей работе карта GLC-2000 Global имеет 23 категории растительности. Данные по эмиссиям примесей на единицу сгоревшей биомассы брались из оригинальной работы (Wiedinmyer et al., 2006) и аппроксимировались на соответствующие категории других карт растительности.

Кроме этого, для сравнения результатов применялась методика оценки эмиссий, основанная на использовании Fire Radiation Power (далее FRP) (Wooster et al., 2006). Расчет эмиссии i -примеси (частной эмиссии) для FRP методики производился по общей формуле

$$Emission_i = k Q e_i,$$

где: $Q = 0.368 FRM$ (МВт); Q – скорость горения, $кг/с$; e_i – эмиссия i примеси на $кг$ сгоревшей биомассы, $г/кг$; k – коэффициент перевода, $с/сут$.

Анализ сгоревших площадей производился по методикам Active Fires (методика оперативного подсчета общего количества и площади пожаров в ИК-диапазоне) (Justice et al., 2002; Giglio et al., 2006; Giglio, 2010), и Burned Areas (методика оценки об-

Таблица 4. Площадь смешанных лесов в процентах от площади региона. Карты растительности GlobCover, (категория – 100) и MCD12Q1, (категория IGBP-5)

Регион	GlobCover			MCD12Q1/IGBP		
	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год
Владимирская обл.	26.61	21.31	–1.32	49.34	58.44	2.27
Тверская обл.	25.24	19.71	–1.38	60.56	67.95	1.85
Ярославская обл.	18.81	18.09	–0.18	54.39	60.88	1.62
Ивановская обл.	18.36	19.17	0.20	45.00	56.26	2.82
Московская обл.	15.16	18.20	0.76	42.38	49.40	1.75
Нижегородская обл.	13.46	12.89	–0.14	44.63	52.43	1.95
Калужская обл.	11.03	17.63	1.65	38.82	44.83	1.50
Рязанская обл.	10.11	7.07	–0.76	20.64	24.43	0.95
Смоленская обл.	8.26	13.12	1.22	36.69	44.15	1.86
Мордовская респ.	6.01	6.86	0.21	18.22	22.54	1.08
Тамбовская обл.	3.49	3.38	–0.03	7.64	8.46	0.21
Пензенская обл.	1.89	3.33	0.36	7.55	10.66	0.78
Липецкая обл.	1.67	2.06	0.10	3.22	3.67	0.11
Москва	0.73	3.88	0.79	13.12	13.18	0.02
Орловская обл.	0.48	1.23	0.19	1.76	2.13	0.09
Тульская обл.	0.11	1.09	0.24	4.64	5.93	0.32
Все регионы	12.53	12.34	–0.05	34.35	40.05	1.42

щей площади, пройденной пожарами, по изменению цвета растительности, продукт MCD45A1 MODIS) (Roy et al., 2008; Boschetti et al., 2009).

Местоположение пожаров при расчетах по методике Active Fires определялось по наборам данных MCD14ML (Global Monthly Fire Location Product), подготовленных Университетом Мэриленда (University of Maryland, Department of Geography), ftp-сервер fuoco.geog.umd.edu (Giglio, 2010). Набор представляет положение пожаров, температуру пиксела по ИК-каналам MWIR-21 (T21, 3.929–3.989 мкм) и MWIR-31 (T31, 10.780–11.280 мкм), радиационную мощность источника (FRP, Fire radiative power) и вероятность достоверности обнаружения очагов пожаров (conf, Detection confidence) (см. (Justice et al., 2002) и modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php)).

В работе использовались GIS-технологии геоинформационной системы (ГИС) ArcInfo, которые позволили, основываясь на данных наборов AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover-2009 и MCD12Q1/IGBP, вычислить как суммарное количество сгоревших площадей, так и количество площадей по различным категориям растительности.

На рис. 4а, б (на цветных вклейках) приведены местоположения пожаров за период 01.08.2010–09.08.2010 по данным MCD14ML (AF) и по данным MCD45 (BA) вблизи крупного подземного торфяного пожара s1 на границе Московской и Рязанской областей. В качестве нижнего слоя выложен снимок GoogleEarth, на котором видна дре-

важная система. Дополнительно были выложены категории 210 и 180 (не приведена на рис.) Envisat/MERIS, показывающие наличие воды на территории торфяника в 2009 г. Сопоставление рис. 4а и 4б показывает, насколько плохо продукт MCD45 описывает пожары на торфяниках и в торфолесах.

В табл. 6 и 7 приведено количество очагов пожаров в исследуемом регионе летом 2010 г. (01.06.2010–01.09.2010) вблизи г. Москвы по методикам Active Fires (далее AF) и Burned Areas (далее BA). В таблицах дополнительно приведены данные по социально значимым объектам, таким, как пашни и населенные пункты.

Согласно методике AF, количество зарегистрированных пожаров спутником Aqua на 16.3% меньше по сравнению с количеством пожаров, зарегистрированных спутником Terra. По методике BA спутники регистрируют на 30.2 и 41.6% меньше пожаров, чем по методике AF для спутников Aqua и Terra соответственно.

При этом количество пожаров в лесах в процентах от общего количества зарегистрированных пожаров по методике AF колеблется от 35% до 75%. При этом карты растительности GLC-2000 и MCD12Q1 показывают, что горят в основном леса (>50%), в то время как из данных GlobCover следует, что в лесах было всего 35% пожаров.

По методике BA следует, что леса в этот период практически не горели. Количество пожарных пикселей изменяется в диапазоне 16–32% от общего числа возгораний.

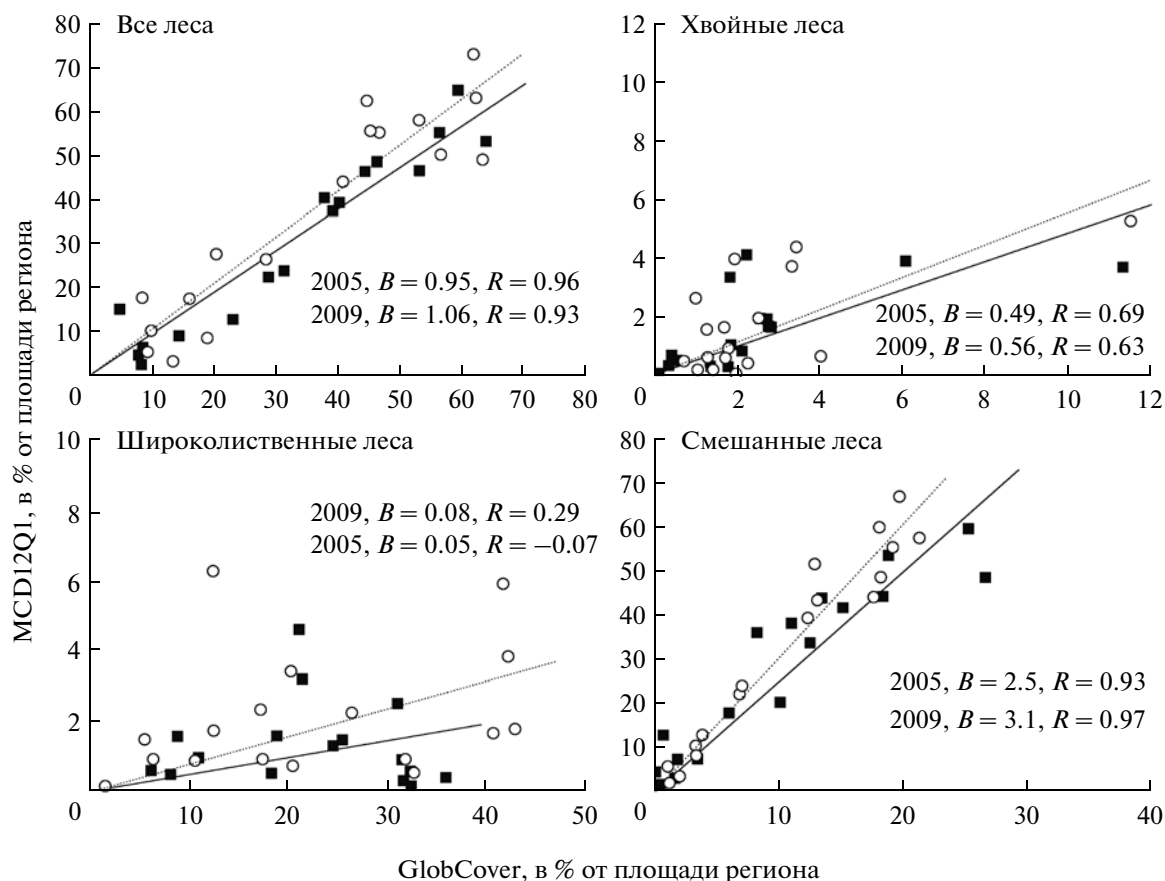


Рис. 3. Коэффициенты корреляции между площадью центральной части среднерусской равнины для категорий карт растительности GlobCover и MCD12Q1/IGBP за 2005 и 2009 гг.

Таким образом, общий диапазон изменения процента возгораний лесов варьируется в пределах 16–75% от общего количества зарегистрированных пожаров в зависимости от методики регистрации факта пожара (AF или BA) и от типа карты растительности.

В этой ситуации сравнение количества пожаров в отдельных типах лесов теряет всякий смысл. Например, количество пожаров для широколиственных лесов по методике AF меняется более чем в 50 раз: (29 очагов по связке AVHRR/UDM – MODIS/Aqua и 1553 очага пожаров для GlobCover-2009 – MODIS/Terra).

Для социально значимых объектов, таких, как пашни, отметим следующее: число возгораний на пахотных землях составляет 5.8–11.3% по методике AF и 29.0–56.6% по методике BA. Методика BA практически не позволяет определить возгорания на территории населенных пунктов. По AF число возгораний в населенных пунктах изменялось в диапазоне 142–227 шт.

Резюмируя эту часть исследования, можно сделать вывод о том, что методика BA несколько лучше регистрирует пожары на полях, в то же время сильно занижает число возгораний в лесах.

Детализация категорий леса, в котором произошло возгорание, затруднительна из-за недостатков имеющихся карт растительности. Наиболее адаптированными для центральной части среднерусской равнины являются карты GLC-2000 и GlobCover-2009, но и для них количество пожаров отличается почти в 2 раза (в 1.8 и 1.9 для Aqua и Terra соответственно).

В табл. 8 и 9 приведены рассчитанные эмиссии окиси углерода от пожаров в лесах с использованием различных карт растительности по методикам определения площади пожаров AF и BA. Отметим, что методика, основанная на использовании FRP, сильно занижает эмиссию от лесных пожаров (см. табл. 10). Причина этого заключается в низких средних значениях $FRP_{ср}$, равных 45.58, 67.57 и 56.17 МВт (по данным Terra, карта GLC-2000) для сплошных листопадных широколиственных лесов, вечнозеленых хвойных лесов и смешанных лесов соответственно.

Средняя эмиссия по всем картам растительности, диапазон изменения и стандартное отклонение приведено в табл. 11. Отличие эмиссий, рассчитанных по методике BA для карты растительности AVHRR/UDM, от эмиссии, рассчитанной

Таблица 5. Общая площадь пахотных земель (GlobCover, категории – 14) в процентах от площади региона и площадь населенных пунктов в процентах от площади населенных пунктов в 2005 г. (GlobCover, категории – 190)

Регион	GlobCover-14			GlobCover-190		
	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год	2005 г., %	2009 г., %	(%)/год
Липецкая обл.	19.12	44.75	6.41	0.87	0.85	–2.35
Тамбовская обл.	14.92	43.71	7.20	0.35	0.34	–3.43
Орловская обл.	23.05	36.61	3.39	0.36	0.36	0.65
Тульская обл.	21.28	30.47	2.30	0.66	0.63	–3.91
Пензенская обл.	10.88	27.22	4.09	0.42	0.39	–6.13
Мордовская респ.	14.15	19.52	1.34	0.36	0.33	–7.08
Рязанская обл.	12.59	19.06	1.62	0.26	0.26	–0.21
Нижегородская обл.	10.04	11.31	0.32	0.55	0.50	–9.53
Калужская обл.	14.09	10.74	–0.84	0.36	0.32	–11.63
Московская обл.	11.52	10.40	–0.28	2.52	2.25	–10.84
Смоленская обл.	11.92	9.90	–0.50	0.20	0.13	–33.02
Ивановская обл.	10.81	9.45	–0.34	0.59	0.56	–5.71
Ярославская обл.	10.78	8.18	–0.65	0.40	0.34	–14.68
Владимирская обл.	7.87	7.19	–0.17	0.47	0.41	–11.61
Тверская обл.	7.12	5.87	–0.31	0.11	0.09	–15.89
Москва	1.66	1.94	0.07	75.67	74.70	–1.27
Все регионы	12.03	16.64	1.15	0.69	0.63	–7.78

по методике АF для карты MCD12Q1/IGBP, более чем на порядок (меньше в 12.45 раз).

Отметим, что за рубежом в последнее время активно развиваются спутниковые дистанционные методы измерения полного содержания различных примесей, в частности, CO. Эти методы относительно новые (начало работ приходится на конец 1990-х годов), и им присущ один серьезный недостаток, а именно – невысокая чувствительность к приземному (ниже 2000 м над поверхностью Земли) слою. В частности, орбитальные спектрометры MOPITT/Terra и AIRS/Aqua, регистрирующие спектры поглощения собственного теплового излучения Земли в области 4.6 мкм (для CO), см. (Aumann et al., 2003; Deeter et al., 2003), зафиксировали летом 2010 г. содержание CO для Москвы, в 2–3 раза меньшие по сравнению с наземными спектрометрами (Фокеева и др., 2011; Yurganov et al., 2011). Несколько лучшие результаты показал спектрометр IASI/Metop-A (Herbert et al., 2004).

Эмиссия CO от пожаров в России летом 2010 г. была получена независимым методом по данным наземных и спутниковых измерений с использованием балансовой модели (Фокеева и др., 2011; Yurganov и др., 2011). Общая эмиссия за июль-август 2010 г. составила: 34 (17) Tg, 40 (22) Tg и 36 (26) Tg (AIRS, MOPITT и IASI соответственно), в скобках – значения эмиссий до внесения поправок с учетом наземных спектроскопических измерений

с точностью $\pm 30\%$ (табл. 11). Эти значения несколько превышают оценку, полученную по методике АF, хотя разница не выходит за пределы погрешности метода. На рис. 5 приведены суточные эмиссии CO по балансовой модели по измерениям, полученным с MOPITT, AIRS и IASI. Дополнительно в виде точек приведены результаты расчетов суточных эмиссий CO по методике АF. Как видно из рис. 5, временные ходы эмиссии хорошо согласуются.

В табл. 12 дополнительно приведены данные расчетов эмиссий CO для областей вокруг Московского мегаполиса за период 01.07.2010–01.09.2010 (в Tg) для всех категорий растительности. Для сопоставления приводятся данные по эмиссионным наборам GFASv1 и GFEDv3.1, пересчитанные для исследуемого в работе региона. Кроме этого, приводятся результаты расчета по методике maxFRP (Kononov et al., 2011). Как следует из табл. 12, эмиссии по GFASv1 на порядок превышают значения эмиссий, полученные с помощью GFEDv3.1.

ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе определена общая площадь лесов, а также площадь хвойных, широколиственных и смешанных лесов Московской, Тверской, Рязанской, Липецкой, Калужской, Нижегородской, Тульской, Владимирской, Ярославской, Ивановской, Орловской, Смоленской, Пензен-

Таблица 6. Количество (в шт.) очагов возгорания в лесах по данным MCD14ML (MODIS/Terra и Aqua) и картам растительности AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009, MCD12Q1-2009. Дополнительно приведены данные по социально значимым объектам, таким как пашни и населенные пункты. Регион – центральная часть Среднерусской равнины, 01.06.2010–01.09.2010

Категории	Карты растительности							
	AVHRR/UDM		GLC-2000		GlobCover-2009		MCD12Q1-2009	
	MCD14ML							
	Aqua	Terra	Aqua	Terra	Aqua	Terra	Aqua	Terra
хвойные леса	3649	4532	5208	6213	539	695	1039	1218
широколиственные леса	29	33	998	1223	1281	1553	65	82
смешанные леса	1387	1615	2086	2552	2495	3193	8020	9717
все леса, шт.	5066	6193	8292	9988	4314	5442	9124	11031
все леса, %*	41.09	42.05	67.25	67.82	34.99	36.95	74.00	74.90
пашни, шт.	1163	1396	1385	1569	720	879	1395	1652
пашни, %*	9.43	9.48	11.23	10.65	5.84	5.97	11.31	11.22
населенные пункты**	–	–	142	193	151	227	169	217
Всего очагов возгорания	12330	14728	12330	14728	12330	14728	12330	14728

Примечание.* – В процентах от общего количества возгораний; ** – категория в AVHRR/UDM отсутствует.

Таблица 7. Количество (в шт.) пожарных пикселей MCD45 по картам растительности AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009, MCD12Q1-2009. Дополнительно приведены данные по социально значимым объектам, таким как пашни и населенные пункты. Регион – центральная часть Среднерусской равнины, 01.06.2010–01.09.2010

Категории	Карты растительности			
	AVHRR/UDM	GLC-2000	GlobCover-2009	MCD12Q1-2009
хвойные леса	1079	1953	232	356
широколиственные леса	3	170	504	22
смешанные леса	291	478	740	2401
все леса, шт.	1377	2601	1477	2784
все леса, %*	16.01	30.24	17.17	32.36
пашни, шт.	2584	3450	2491	4869
пашни, %*	30.04	40.11	28.96	56.60
населенные пункты**	–	1	2	1
Всего очагов возгорания	8602	8602	8602	8602

Примечание.* – В процентах от общего количества возгораний; ** – категория в AVHRR/UDM отсутствует.

ской, Тамбовской областей и республики Мордовия в процентах от общей площади региона по картам растительности AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover и MCD12Q1/IGBP (рис. 2). Исследована динамика изменения структуры лесов для указанных регионов (табл. 1–4). Приведена динамика изменения площадей пахотных угодий и населенных пунктов за период 2005–2009 гг. по картам растительности GlobCover (табл. 5). Определены коэффициенты корреляции между площадью для категорий карт растительности GlobCover и MCD12Q1/IGBP (рис. 3).

Предлагается в дальнейшем для оценки пожарных эмиссий использовать карты GlobCover-2009 европейского космического агентства ESA, спутник Envisat/MERIS, так как эти карты растительности оказались лучше адаптированными к растительности европейской части России.

Определено количество очагов возгорания с разбивкой по категориям лесов по данным MCD14ML (MODIS/Terra/Aqua, методика AF) и MCD45 (методика BA), с использованием карт растительности AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009, MCD12Q1-2009 (табл. 6 и 7).

Таблица 8. Эмиссия CO (в Tг) от лесных пожаров по данным MCD14ML (MODIS/Terra и Aqua) и картам растительности AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009, MCD12Q1-2009/IGBP. Регион – центральная часть Среднерусской равнины, 01.06.2010–01.09.2010

Категории	Карты растительности							
	AVHRR/UDM		GLC-2000		GlobCover-2009		MCD12Q1-2009	
	MCD14ML							
	Aqua	Terra	Aqua	Terra	Aqua	Terra	Aqua	Terra
хвойные леса	13.39	16.63	19.11	22.80	1.98	2.55	3.81	4.47
широколиственные леса	0.08	0.09	2.79	3.42	3.58	4.34	0.18	0.23
смешанные леса	4.32	5.04	6.50	7.96	7.78	9.96	25.00	30.30
Все леса	17.79	21.76	28.40	34.17	13.34	16.85	29.00	34.99

Таблица 9. Эмиссия CO (в Tг) от лесных пожаров MCD45 по картам растительности AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009 и MCD12Q1-2009/IGBP. Регион – центральная часть Среднерусской равнины, 01.06.2010–01.09.2010

Категории	Карты растительности			
	AVHRR/UDM	GLC-2000	GlobCover-2009	MCD12Q1-2009
хвойные леса	2.28	4.13	0.49	0.75
широколиственные леса	0.00	0.27	0.81	0.04
смешанные леса	0.52	0.86	1.33	4.31
Все леса	2.81	5.26	2.63	5.10

Оценена эмиссия CO от лесных пожаров по методикам AF и BA для различных карт растительности (табл. 8–9). Проведено сопоставление с результатами расчета при использовании методики FRP (табл. 10).

Показано, что методика BA (<35%) занижает количество возгораний в лесах по сравнению с количеством пожаров, определенных по методике AF (>35%), (см. табл. 6–7, строка “все леса, %”). При этом методика BA сильно завышает число возгораний на пахотных угодьях (>30%).

Показано, что методика FRP (без учета суточного хода) дает совсем низкие значения эмиссий, в 2.5 раза ниже, чем по методике BA (в 2.3 и 2.8 для Terra и Aqua соответственно).

Отметим, что величина эмиссий, полученная независимым методом (балансовая методика “top-down”) с использованием только результатов наземных и спутниковых измерений содержания CO, наиболее близка к оценке эмиссий с использованием методики AF, хотя и несколько превышает ее (см. табл. 11). В дополнение заметим, что отечественных орбитальных спектрометров, способных измерять содержания газов в тропосфере, к сожалению, еще не запущено. Опыт работы специалистов ИФА по валидации ино-

странных орбитальных сенсоров MOPITT, AIRS, IASI позволяет предположить, что в случае появления таких приборов и постоянной валидации их данных с помощью существующих наземных

Таблица 10. Эмиссия CO (в Tг) от лесных пожаров MCD14ML (MODIS/Terra и Aqua) по карте растительности GLC-2000. Методика расчета с использованием FRP пожаров (Wooster et al., 2005). Регион – центральная часть среднерусской равнины, 01.06.2010–01.09.2010

Категории	Карта растительности GLC-2000	
	MCD14ML	
	Aqua	Terra
хвойные леса	0.98	1.19
широколиственные леса	0.14	0.17
смешанные леса	0.28	0.37
все леса	1.40	1.73
Все категории	1.88	2.29

Таблица 11. Эмиссия CO (в Tt) от лесных пожаров по данным MCD14ML и MCD45, усредненная по картам растительности AVHRR/UDM (1993), GLC-2000, GlobCover-2009 и MCD12Q1-2009/IGBP

№	Методика	Продукт MODIS	Среднее значение	Стандартное отклонение
1	Active Fires	MCD14ML	24.54	8.24
2	Burned Areas	MCD45	3.95	1.42
3	MOPITT		39.6	11.9
4	AIRS		33.7	10.1
5	IASI		35.6	10.7

Примечание. Для сравнения в 3-, 4- и 5-й строках приводятся эмиссии, полученные независимым способом с использованием данных о содержании CO орбитальных спектрометров MOPITT и AIRS и наземных спектрометров ИФА и ЗНС.

средств контроль загрязнения тропосферы может быть осуществлен с высокой точностью.

Можно утверждать, что неопределенность в оценку эмиссии окиси углерода от пожаров вносят ряд факторов. Ниже они приводятся в порядке уменьшения эффекта:

– при использовании различных методик определения площади пожаров и оценки эмиссий (AF, BA и FRP) величины эмиссий могут отличаться на порядок;

– при использовании различных карт растительности (AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover

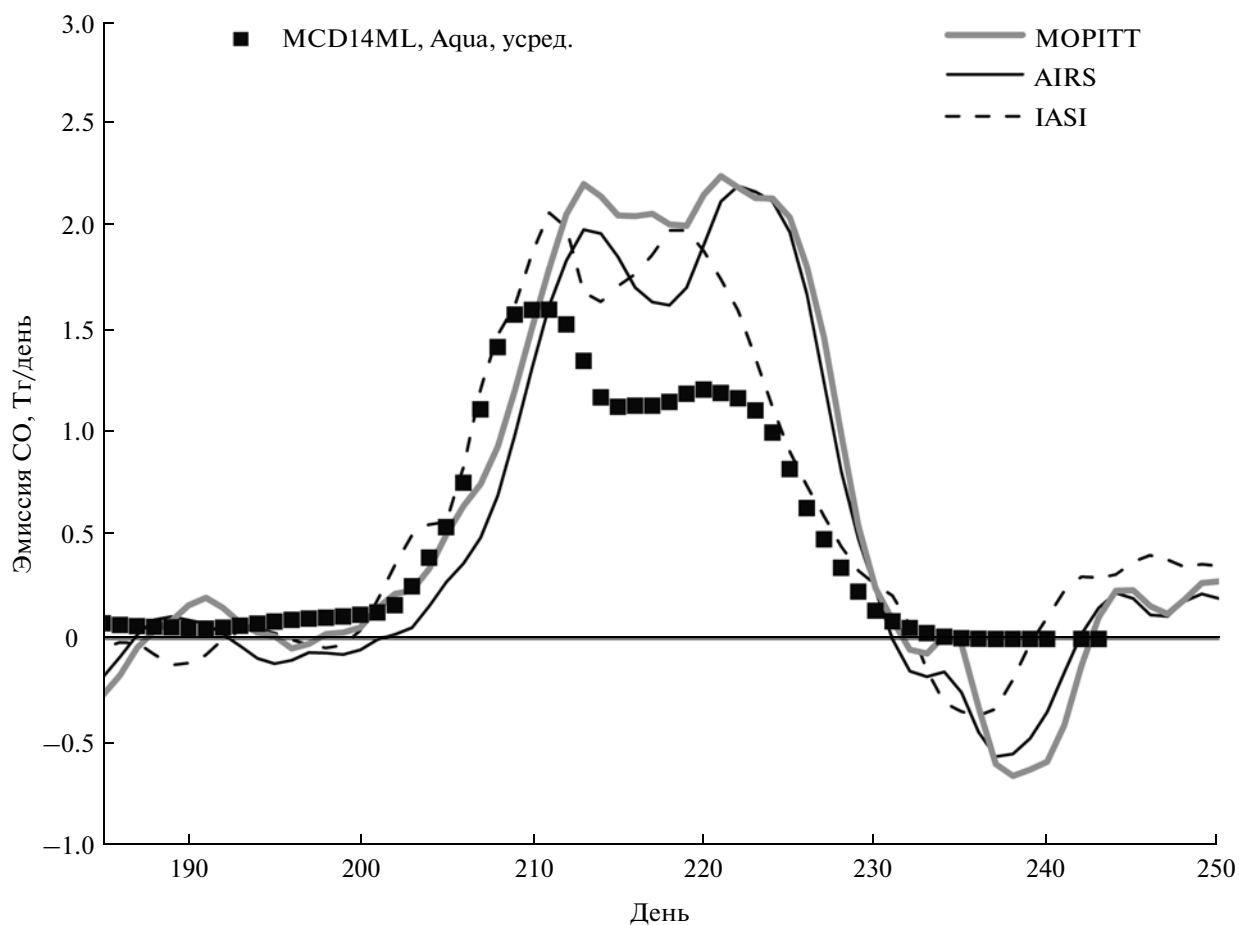


Рис. 5. Эмиссии CO над Москвой по данным спутников MOPITT, AIRS и IASI в 2010 г. Дополнительно точками отмечены усредненные за пять дней эмиссии CO, полученные по методике AF по данным MCD14ML/Aqua для карты растительности GLC-2000.

Таблица 12. Сравнение эмиссий CO по различным методикам для областей вокруг мегаполиса Москва за период 01.07.2010–01.09.2010 (в Tg) для всех категорий растительности. При расчетах использовалась карта растительности GLC-2000. Дополнительно через косую черту приведены эмиссии от растительности, произрастающей на торфяниках (поверхностные торфяные пожары)

Методика AF		
MCD14ML	Aqua	Terra
		29.29/12.13
Методика FRP		
FRP	Aqua	Terra
		1.85/0.65
GFASv1*	11.07/8.37	
maxFRP**	4.89/1.58	
Методика BA		
MCD45	5.72/1.09	
GFEDv3.1***	1.53/0.45	

Примечание. * (Kaiser et al., 2011); ** (Kononov et al., 2011); *** (Werf et al., 2010).

и MCD12Q1/IGBP) величины эмиссий могут отличаться в 2 раза;

– при использовании данных различных спутников, на которых установлен спектрометр MODIS (Terra или Aqua), величины эмиссий могут отличаться в 1.2–1.5 раза;

– при учете динамики изменения растительного покрова ошибка составляет порядка 4–7% в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено сравнение различных карт растительности AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover и MCD12Q1/IGBP. Рекомендуется при проведении оперативных оценок эмиссий от пожаров в европейской части России использовать готовые карты растительности GLC-2000 и GlobCover-2009, так как они лучше адаптированы к типам растительности, произрастающим в европейской части России, и имеют пространственное разрешение, сопоставимое с данными сенсора MODIS.

Показано, что методика BA, основанная на продукте MCD45, не применима для оценок эмиссий от торфяных пожаров. Показано также, что из-за подземного характера горения торфа

методика FRP сильно занижает значение эмиссии окиси углерода.

Проведено сопоставление рассчитанных в работе эмиссий с оценкой, полученной на основе данных спутниковых спектрометров MORIT, AIRS, IASI и наземных спектрометров ИФА и ЗНС. Показано, что в случае торфяных пожаров 2010 г. наилучшее согласие с этой оценкой получено при использовании AF методики.

Рассчитанные эмиссии CO сопоставлялись с результатами других авторов, использующих методики GFASv1 (Kaiser et al., 2011), maxFRP (Kononov et al., 2011), GFEDv3.1 (Werf et al., 2010). Эмиссии CO от пожаров, полученные в настоящей работе по методике AF (32.30 Tg), превышают оценки, полученные с помощью эмиссионного набора GFASv1 (11.07 Tg) в 3 раза, и в 20 раз – оценки, полученные с помощью набора GFEDv3.1 (1.53 Tg).

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты № 10-05-00207 и № 11-05-00305).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барталев С.А., Беляев А.И., Егоров В.А., Еришов Д.В., Коровин Г.Н., Коришунов Н.А., Котельников Р.В., Лупян Е.А. Валидация результатов выявления и оценки площадей, поврежденных пожарами лесов по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: Азбука-2000, 2006. Вып. 3. Т. I. С. 359–365.

Барталев С.А., Еришов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е. Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: ДоМира, 2010. Т. 7. № 1. С. 97–105.

Бондур В.Г. Актуальность и необходимость космического мониторинга природных пожаров в России // Вестн. ОНЗ РАН. 2010. Т. 2. № Z11001. doi:10.2205/2010NZ000062.

Галеев А.А., Котельников Р.В., Крашенинникова Ю.С., Лупян Е.А., Сементин В.Л., Флитман Е.В., Щербенко Е.В. Сопоставление информации о лесных пожарах по данным спутниковых, наземных и авиационных наблюдений ИСДМ-Рослесхоз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: Азбука-2000, 2008. Вып. 5. Т. II. С. 458–468.

Егоров В.А., Барталев С.А., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В. Сравнительный анализ результатов детектирования

- пройденных огнем площадей на территории Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation и Terra-MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: Азбука-2000, 2008. Вып. 5. Т. II. С. 292–296.
- Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б., Березина Е.В., Елохов А.С., Иванов В.А., Панкратова Н.В., Постыляков О.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А.* Газовый состав приземной атмосферы в Москве в экстремальных условиях лета 2010 г. // Докл. РАН. 2011. Т. 437. № 1. С. 90–96. doi:10.1134/S0869565211070206.
- Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Голицын Г.С., Грисенко А.М., Лаврова О.В., Панкратова Н.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А.* Наблюдение состава атмосферы в московском мегаполисе с передвижной лаборатории // Докл. РАН. 2010. № 2. С. 250–256. doi:10.1134/S0869565210140227.
- Уваров И.А., Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Ховратович Т.С.* Структура и функциональные возможности информационной системы TerraNorte для поддержки спутникового мониторинга бореальных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: Азбука-2000, 2006. Вып. 3. Т. II. С. 375–379.
- Фокеева Е.В., Сафронов А.Н., Ракитин В.С., Юрганов Л.Н., Гречко Е.И., Шумский Р.А.* Исследование влияния пожаров в июле-августе 2010 года на загрязнение окисью углерода атмосферы Москвы и окрестностей, оценка эмиссий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6 (в печати).
- Al-Saadi, J., Soja A., Pierce R.B., Szykman J., Wiedinmyer C., Emmons L., Kondragunta S., Zhang X., Kittaka C., Schaack T., Bowman K.* Evaluation of Near-Real-Time Biomass Burning Emissions Estimates Constrained by Satellite Active Fire Detections // J. Appl. Rem. Sens. 2008. V. 2. P. 1–24. doi:10.1117/1.2948785.
- Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C. et al.* AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2003. V. 41. № 1.2. P. 253–264. doi:10.1109/TGRS.2002.808356.
- Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S.* A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // Int. J. Rem. Sens. 2003. V. 24. № 9. P. 1977–1982.
- Bartholomé E., Belward A.S.* GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. // Int. J. Rem. Sens. 2005. V. 6. № 9. P. 1959–1977.
- Boschetti L., Roy D., Hoffmann A.A.* MODIS Collection 5 Burned Area Product – MCD45. User's Guide. Version 2.0. November 2009. 30 p.
- Deeter M.N., Emmons L.K., Francis G. et al.* Operational carbon monoxide retrieval algorithm and selected results for the MOPITT instrument // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № D14. P. 4399. doi:10.1029/2002JD003186.
- Dianov-Klokov V.I., Yurganov L.N., Grechko E.I., Dzhola A.V.* Spectroscopic measurements of atmospheric carbon monoxide and methane. 1: Latitudinal distribution // J. Atmos. Chem. 1989. V. 8. № 2. P. 139–151.
- Foody G.M.* Status of land cover classification accuracy assessment // Rem. Sens. Environ. 2002. V. 80. P. 185–201.
- Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F., Zhang X.Y., Muchoney D., Strahler A.H., Woodcock C.E., Gopal S., Schneider A., Cooper A., Baccini A., Gao F., Schaaf C.* Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results // Rem. Sens. Environ. 2002. V. 83. № 1–2. P. 287–302.
- Fritz F., McCallum I., Schill C., Perger C., Grillmayer R., Achard F., Kraxner F., Obersteiner M.* Geo-Wiki.Org: The Use of Crowdsourcing to Improve Global Land Cover // Rem. Sens. Environ. 2009. V. 1. P. 345–354. doi:10.3390/rs1030345.
- Giglio L.* MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide Version 2.4 // Science Systems and Applications Inc. Univ. Maryland. Dep. Geography. 18 February 2010. 60 p.
- Giglio L., Csiszar I., Justice C.O.* Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua MODIS sensors // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № G02016. doi:10.1029/2005JG000142.
- Giri C., Zhu Z., Reed B.* A comparative analysis of the Global Land Cover 2000 and MODIS land cover data sets // Rem. Sens. Environ. 2005. V. 94. P. 123–132. doi:10.1016/j.rse.2004.09.005.
- Global Land Cover 2000 database. European Commission, Joint Research Centre, 2003, <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php>.
- Guenther A., Karl T., Harley P., Wiedinmyer C., Palmer P.I., Geron C.* Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) // Atmos. Chem. Phys. 2006. V. 6. P. 3181–3210.
- Hansen M., DeFries R., Townshend J.R.G., Sohlberg R.* Global land cover classification at 1 km resolution using a decision tree classifier // Int. J. Rem. Sens. 2000. V. 21. № 6–7. P. 1331–1364.
- Hansen M.C., Reed B.* A comparison of the IGBP DISCover and University of Maryland 1km global land cover products // Int. J. Rem. Sens. 2000. V. 21. № 6–7. P. 1365–1374.
- Hebert Ph., Blumstein D., Buil C., Carlier T., Chalon G., Astruc P., Clauss A., Sim'oni D., Tournier B.* IASI instrument: technical description and measured performances // Proc. 5th Int. Conf. Space Optics (ICSO 2004). 30 March–2 April 2004. Toulouse, France. ESA SP-554. Noordwijk, Netherlands: ESA Publ. Div., 2004. P. 49–56.
- Iwao K., Nishida K., Kinoshita T., Yamagata Y.* Validating land cover maps with degree confluence project informa-

- tion // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. № L23404. doi:10.1029/2006GL027768.
- Iwao K., Nasahara K.N., Kinoshita T., Yamagata Y., Patton D., Tsuchida S.* Creation of new global land cover map with map integration // *J. Geogr. Inf. Sys.* 2011. V. 3. P. 160–165. doi:10.4236/jgis.2011.32013.
- Jung M., Henkel K., Herold M., Churkina G.* Exploiting synergies of global land cover products for carbon cycle modeling // *Rem. Sens. Environ.* 2006. V. 101. P. 543–553. doi:10.1016/j.rse.2006.01.020.
- Justice C.O., Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morisette J.T., Roy D., Descloitres J., Alleaume S., Petitcolin F., Kaufman Y.* The MODIS fire products // *Rem. Sens. Environ.* 2002. V. 83. P. 244–262.
- Kaiser J.W., Heil A., Andreae M.O., Benedetti A., Chubarova N., Jones L., Morcrette J.J., Razinger M., Schultz M.G., Suttie M., van der Werf G.R.* Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power // *Biogeosci. Discuss.* 2011. V. 8. № HH.7339–7398. doi:10.5194/bgd-8-7339-2011.
- Konovalov I.B., Beekmann M., Kuznetsova I.N., Yurova A., Zvyagintsev A.M.* Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of the extreme air pollution episode in the Moscow megacity region // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2011. V. 11. P. 12141–12205. doi:10.5194/acpd-11-12141-2011.
- Loveland T.R., Reed B.C., Brown J.F., Ohlen D.O., Zhu Z., Yang L., Merchant J.* Development of a global landcover characteristics database and IGBP DISCover from 1km AVHRR data // *Int. J. Rem. Sens.* 2000. V. 21. P. 1301–1330.
- Loveland T.R., Zhu Z., Ohlen D.O., Brown J.F., Reed B.C., Yang, L.* An analysis of the IGBP Global Land-Cover Characterization Process // *Photogram. Engin. Rem. Sens.* 1999. V. 65. P. 1021–10320.
- Mayaux P., Eva H., Gallego J., Strahler A.H., Herold M., Agrawal S., Naumov S., De Miranda E.E., Di Bella C.M., Ordoyne C., Kopin Y., Roy P.* Validation of the Global Land Cover 2000 Map // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2006. V. 44. № 7. P. 1728–1739. doi:10.1109/TGRS.2006.864370.
- McCallum I., Obersteiner M., Nilsson S., Shivdenko A.* A spatial comparison of four satellite derived 1 km global land cover datasets // *Appl. Earth Observ. Geoinf.* 2006. V. 8. № 4. P. 246–255. doi:10.1016/j.jag.2005.12.002.
- Poupkou A., Giannaros T., Markakis K., Kioutsiouk I., Curci G., Melas D., Zerefos C.* A model for European Biogenic Volatile Organic Compound emissions: Software development and first validation // *Environ. Modell. Soft.* 2010. V. 25. P. 1845–1856. doi:10.1016/j.envsoft.2010.05.004.
- Roy D.P., Boschetti L., Justice C.O., Ju J.* The Collection 5 MODIS Burned Area Product – global evaluation by comparison with the MODIS Active Fire Product // *Rem. Sens. Environ.* 2008. V. 112. P. 3690–3707.
- See L.M., Fritz S.A.* Method to compare and improve land cover datasets: Application to the GLC-2000 and MODIS Land Cover Products // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* V. 44. № 7. P. 1740–1746. 10.1109/TGRS.2006.874750.
- Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 2nd ed. 1225 p.
- Stolbovoi V., Savin. I.* Maps of soil characteristics // *Land resources of Russia / Eds.: Stolbovoi V., McCallum I.* Luxemburg, Austria: Int. Inst. Appl. Sys. Analys. and RAS, 2002. CD-ROM. Distr. NSIDC/WDCG, Boulder.
- Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S., Hewson J.H., Soja A.J., Csiszar I.A., Hyer E.J., Loboda T., Conrad S.G., Romasko V.I., Pavlichenko E.A., Miskiv S.I., Slinkina O.A.* AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies // *Rem. Sens. Environ.* 2004. V. 93. P. 546–564. doi:10.1016/j.rse.2004.08.011.
- van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., DeFries R.S., Jin Y., van Leeuwen T.T.* Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009) // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P.11707–11735. doi:10.5194/acp-10-11707-2010.
- Wiedinmyer C., Quayle B., Geron C., Belote A., McKenzie D., Zhang X., O'Neill S., Wynne K.K.* Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling // *Atm. Environ.* 2006. V. 40. P. 3419–3432.
- Witte J.C., Douglass A.R., da Silva A., Torres O., Levy R.C., Duncan B.N.* NASA A-Train and Terra observations of the 2010 Russian wildfires // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2011. V. 11. P. 19113–19142. doi:10.5194/acpd-11-19113-2011.
- Wooster M.J., Roberts G., Perry G.L.W., Kaufman Y.J.* Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № D24311. doi:10.1029/2005JD006318.
- Yurganov L.N., Grechko E.I., Dzhola A.V.* Long-term measurements of carbon monoxide over Russia using a spectrometer of medium resolution // *Recent Res. Devel. Geophys.* 2002. V. 4. P. 249–265.
- Yurganov L., McMillan W., Grechko E., Dzhola A.* Analysis of global and regional CO burdens measured from space between 2000 and 2009 and validated by ground-based solar tracking spectrometers // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 3479–3494. doi:10.5194/acp-10-3479-2010.
- Yurganov L., Rakitin V., Dzhola A., August T., Fokeeva E., George M., Gorchakov G., Grechko E., Hannon S., Karpov A., Ott L., Semutnikova E., Shumsky R., Strow L.* Satellite- and ground-based CO total column observations over 2010 Russian fires: accuracy of top-down estimates based on thermal IR satellite data // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 7925–7942. doi:10.5194/acp-11-7925-2011.

Carbon Monoxide Emissions in Summer 2010 in the Central Part of Russian Plain and Estimation of their Uncertainties with Different Land Cover Maps Using

A. N. Safronov¹, E. V. Fokeeva¹, V. S. Rakitin¹, L. N. Yurganov², E. I. Grechko¹

¹ *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Joint Center for Earth System Technology, University of Maryland Baltimore, USA*

Carbon monoxide emission estimation of wildfires during anomaly hot summer 2010 in the central part of Russian plain was the goal of our study. The comparison of different vegetation maps and investigation of forest structure dynamics for 2005–2009 periods have been carried out. The “Active Fires” (product MODIS – MCD14ML) and “Burned Areas” (product MODIS – MCD45) methods with AVHRR/UDM, GLC-2000, GlobCover and MCD12Q1 vegetation maps have been used to obtain CO emission from forest wildfires. It is shown that the major uncertainties of an estimation emission of CO in descending order are: the distinctions in emission calculation methods, the differences in vegetation maps used the differences of the satellites data from Terra and Aqua, and the insufficient registration of forest structure dynamics. In addition and to compare we bring the emission estimations obtained by independent method with using of orbital (MOPITT, AIRS, IASI) and ground based (Moscow, Zvenigorod) spectroscopic measurements of CO total content.

Keywords: forest and peat wildfire, carbon monoxide, vegetation maps, satellite measurements, spectroscopic measurements, pollution transport modeling, estimation of emissions, central part of Russian plain

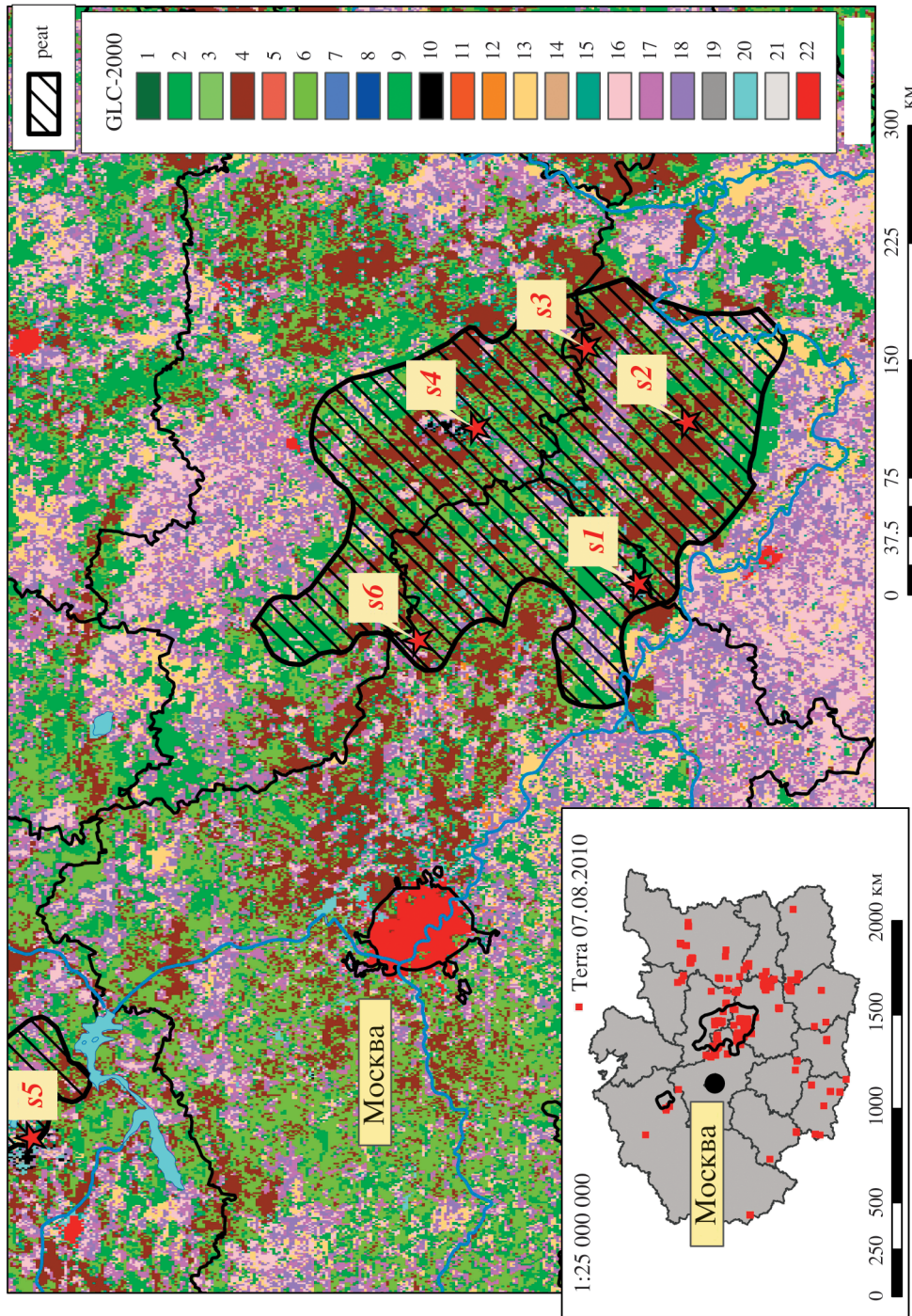


Рис. 1. Карта растительности GLC-2000 (SPOT-4/VGN) Global v1.1 вблизи мегаполиса Москва с отмеченными на ней торфяниками: s1-s6 – основные очаги (подземных) торфяных пожаров, дополнительно отмечены крупные водохранилища и реки, на вкладке – исследуемый домен и очаги пожаров по данным MODIS/Terra на 07.08.2010 г.

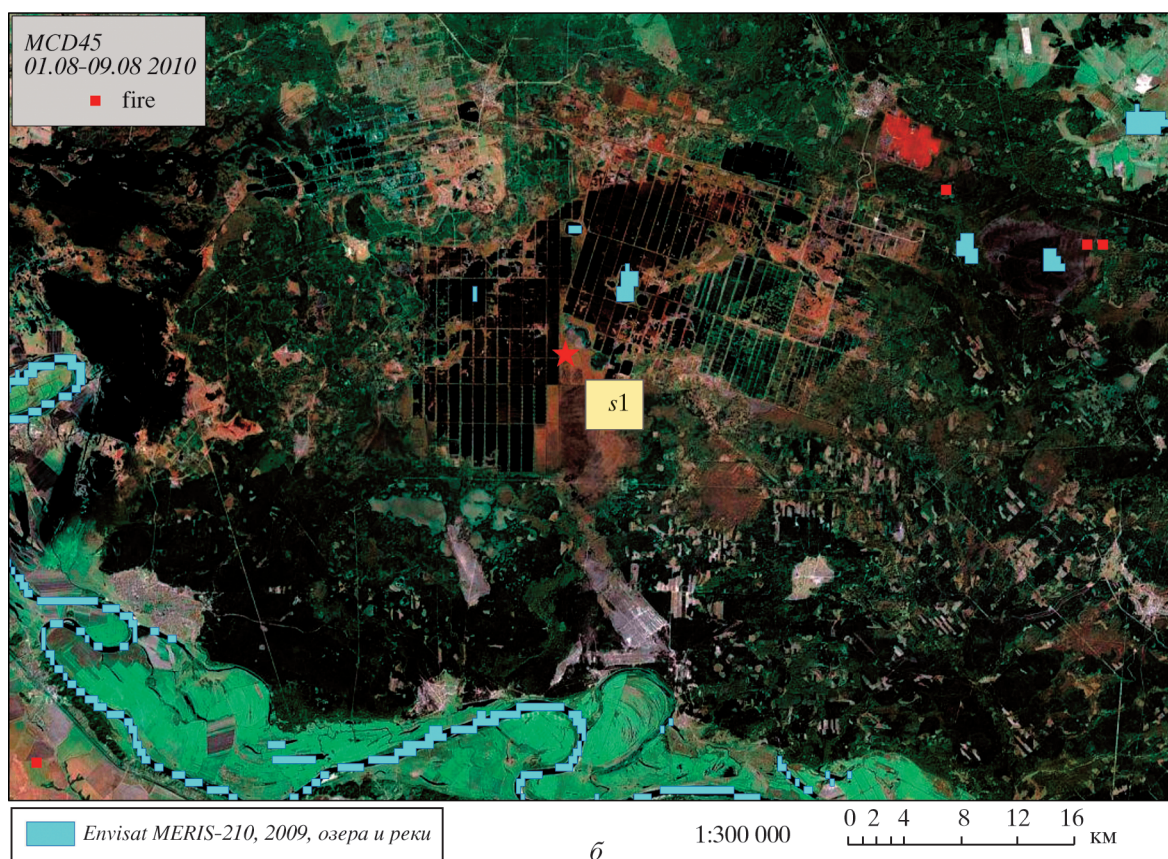
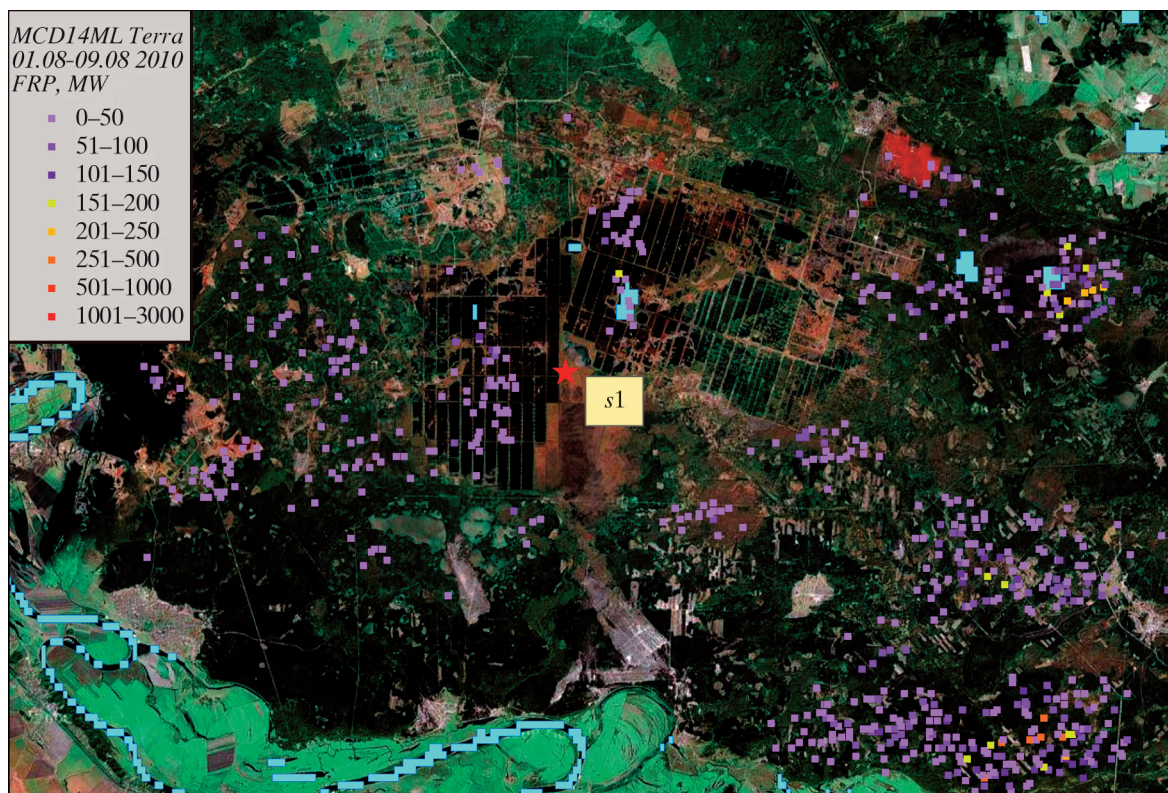


Рис. 4. Детализация торфяника, расположенного вблизи модельного источника s1, на космическом снимке в GoogleEarth: темные квадраты – участки добычи торфа; голубой цвет между квадратами – дренажная система (дополнительно отложена водная гладь по Envisat/MERIS-210, 2009 г.). На части рисунка a – дополнительным слоем нанесены очаги пожаров (в виде точек), градуированные по величине FRP, по данным спутника MODIS/Terra (MCD14ML, методика AF, 01.08-09.08 2010 г.); на части б – очаги пожаров (в виде красных точек), по данным спутника MODIS/Terra/Aqua (MCD45, методика BA, 01.08-09.08 2010 г.).

