

ОЦЕНКА ПЛОЩАДЕЙ ПОВРЕЖДЕНИЙ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ПОЖАРАМИ В 2000–2003 ГОДАХ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТА SPOT-VEGETATION

С.А. Барталев, В.А. Егоров, Е.А. Лупян, И.А. Уваров

¹*Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mails: bemi@d902.iki.rssi.ru*

В статье представлены результаты использования нового метода мониторинга повреждений растительности пожарами по данным спутниковых наблюдений на территории Северной Евразии за период 2000-2003 годов. Метод основан на совместном использовании временных серий данных прибора Vegetation со спутников SPOT-4/-5 и температурных аномалий, детектируемых в период горения по данным радиометра MODIS со спутников Terra и Aqua. Полученные в работе данные позволяют оценить площади повреждений, а также исследовать их сезонную и межгодовую динамику в различных типах растительного покрова, включая леса и тундры, травяно-кустарниковые растительные сообщества, болотные комплексы и некоторые другие типы наземных экосистем. Оценка точности созданных информационных продуктов по повреждениям растительности огнем выполнена путем их сравнения с репрезентативной выборкой опорных данных, сформированных по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения Landsat-ETM+, а также с использованием методов авиационных и наземных обследований. Разработанная автоматическая технология обработки спутниковых данных открывает возможность регулярного мониторинга воздействия пожаров на экосистемы бореальной зоны планеты. Созданная база данных о повреждениях экосистем пожарами может найти широкое применение для решения задач устойчивого управления растительными ресурсами, и в частности лесами, для оценки потоков углерода и ряда других компонентов биогеохимических циклов в связи с моделированием процессов глобального изменения климата.

Введение

Пожары относятся к числу наиболее мощных природных факторов воздействия на наземные экосистемы планеты, значение экологических, экономических и социальных последствий которых трудно переоценить. Гибель лесных насаждений, повреждение органического слоя почв и возрастающая угроза почвенной эрозии, изменение химического состава атмосферы и ее пропускной способности для солнечного излучения являются лишь немногими примерами последствий воздействия огня на экосистемы, климат и экономику человеческого сообщества. В связи с нарастающим вниманием ученых и международных политических институтов к наблюдаемым в течение двадцатого столетия процессам глобального изменения климата, растет необходимость в получении количественных данных о влиянии пожаров на концентрацию в атмосфере парниковых газов CO₂, CO и CH₄ [1, 2]. При этом обе связанные с пожарами составляющие потока парниковых газов в атмосферу, а именно их эмиссия, происходящая непосредственно в процессе горения, и последующее выделение в результате послепожарной деструкции погибшей растительности, требуют адекватного учета в моделях глобального цикла углерода [3].

Анализ многолетних данных метеорологических наблюдений наглядно демонстрирует, что глобальное потепление климата наиболее существенно проявляется в бореальной зоне планеты, и, прежде всего, в Северной Евразии [4], что, в свою очередь, с высокой вероятностью обуславливает усиление пожарной активности в бореальных экосистемах и нарушенности экосистем пожарами [5, 6]. Регион Северной Евразии обладает рядом уникальных экологических, климатических и социально-экономических особенностей и охватывает широкий спектр биомов, в частности, таких как тундра, таежные леса, степи, для которых пожары часто выступают неотъемлемым фактором естественной динамики экосистем.

В основе подходов, применяемых при определении объемов эмитированного в атмосферу углерода [3, 6, 7, 8, 9, 10] и при оценке экономического ущерба от лесных пожаров [11], наряду с рядом других необходимых параметров, лежит использование данных о поврежденной огнем площади растительного покрова. Необходимость регулярного получения однородных по точности данных на больших территориях стимулировала в последние годы исследования возможностей использования спутниковых данных для картографирования повреждений растительности пожарами на уровне стран и крупных регионов [12, 13], континентов [14, 15] и планеты в целом [16, 17].

Существующие до настоящего времени и получаемые из различных источников данные о масштабах воздействия огня на растительность Северной Евразии достаточно противоречивы и, часто, трудно сопоставимы между собой. В зависимости от источника данных, эта несопоставимость является следствием различий в

методах сбора информации, полноты охвата территории и частоты наблюдений, а также отражает влияние субъективных факторов или существующих экономических ограничений в странах и регионах.

Так, регулярная оценка пройденных огнем площадей в России выполняется службой охраны лесов на примерно 2/3 территории лесного фонда, главным образом методом визуальных авиационных и наземных наблюдений [18]. При этом наблюдения за воздействием пожаров на другие типы экосистем (тундра, степи и др.) практически не проводятся, или проводятся на очень ограниченных территориях.

Современные методы спутникового дистанционного зондирования открывают практически безальтернативную возможность регулярного мониторинга последствий пожаров, и особенно, при получении глобальных оценок, а также оценок на уровне таких крупных регионов как Северная Евразия или стран как Россия. Появившиеся в последние годы, спутниковые приборы, такие как Vegetation на спутниках SPOT-4/5 и MODIS на спутниках Terra и Aqua, позволяют практически реализовать преимущества дистанционных методов и создать систему регулярного мониторинга поврежденных огнем экосистем. Это обусловлено не только техническими характеристиками указанных приборов, но и, что существенно, высоким уровнем доступности получаемых данных, включая эффективные системы удаленного доступа пользователей.

Вместе с тем, полученные до настоящего времени с использованием спутниковых данных для территории Северной Евразии оценки масштабов повреждений, как правило, являются результатами исследовательских проектов и носят эпизодический характер [15, 16, 17, 19]. Имеются также оценки площадей повреждений за относительно продолжительный период [13], однако полный охват территории России в этом исследовании был получен за период 1995-1998 годов, в то время как относительно продолжительная временная серия данных (1995-2002 годы) характеризует только азиатскую территорию страны. При этом полученные из различных источников оценки во многом, как будет показано ниже в настоящей работе, противоречивы и не вполне согласуются между собой. Проведенный в рамках настоящего исследования анализ имеющихся различий в опубликованных оценках показывает, что они могут быть объяснены различиями в характеристиках спутниковых приборов, методах анализа данных, охвате территории, принятых схем классификации типов наземных экосистем и источников вспомогательных данных. Вместе с тем, указанная несогласованность в оценках часто приводит к искаженным представлениям о масштабах воздействия пожаров на наземные экосистемы Северной Евразии, а также к тому, что в ряде исследований используются приблизительные экспертные оценки пройденных огнем площадей. Например, в некоторых работах для территории России экспертно приняты среднегодовые оценки пройденной огнем площади в $3 \cdot 10^6$ га [10] и в $3,6 \cdot 10^6$ га [20], при одновременном допущении в последнем случае, что диапазон возможных межгодовых вариаций площадей повреждений характеризуется интервалом $1,5 \cdot 10^6 - 21 \cdot 10^6$. Ряд исследователей пользуется данными официальной статистики, согласно которой на активно охраняемой территории лесного фонда России ежегодно лесные пожары охватывают площадь от $0,5 \cdot 10^6$ га до $5,2 \cdot 10^6$ га [5].

Институтом космических исследований РАН (ИКИ РАН) совместно с Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, а также рядом других институтов Российской Академии Наук проводится комплекс научных исследований и разработок, направленных на создание методов и автоматизированных технологий использования данных спутниковых наблюдений для мониторинга последствий воздействия пожаров на наземные экосистемы. Эти работы в ИКИ РАН объединены в долгосрочный исследовательский проект BIS (Burnt area Inventory from Satellite).

Результаты, выполненных по данному направлению исследований изложены в настоящем сборнике в виде серии сопряженных публикаций, включая данную работу, а также статей с описанием алгоритма обработки спутниковых данных для картографирования поврежденных пожарами участков [21], системы удаленного доступа пользователей к базе данных о повреждениях пожарами в регионе Северной Евразии [22], результатов валидации полученных информационных продуктов [23], а также статьи, посвященной использованию данной разработки в российской системе дистанционного мониторинга лесных пожаров [24]. В целом выполняемое на данном этапе исследование преследует следующие основные цели:

- Разработать метод картографирования повреждений растительности пожарами на уровне всего региона Северной Евразии, а в перспективе и на циркумполярном уровне бореального пояса планеты, удовлетворяющий следующим критериям:
 - высокий уровень достоверности оценок повреждений, достигаемый за счет использования мультисенсорного подхода, а также комбинированного учета критериев, характеризующих изменения как температурных, так и спектральных свойств поверхности, включая анализ их внутригодовой и межгодовой динамики;
 - уровень временного разрешения получаемых информационных продуктов, должен обеспечивать возможность анализа внутригодовой динамики повреждений на возможно более высоком уровне детальности;
 - полная автоматизация процесса обработки данных для обеспечения регулярного мониторинга повреждений растительности пожарами и обновления банка данных;

- Сформировать банк данных о повреждениях растительного покрова Северной Евразии пожарами по результатам обработки полученных к настоящему времени спутниковых данных и сделать его доступным для решения широкого спектра научных и прикладных задач;
- Провести валидацию полученных данных о повреждениях с использованием опорной информации из независимых источников, для того чтобы оценить точность разработанного метода и получаемых информационных продуктов;
- Провести сравнительный анализ разработанной базы данных с другими доступными информационными продуктами о повреждениях растительного покрова Северной Евразии пожарами, а также определить возможные пути сопряжения и стандартизации существующих и будущих информационных продуктов такого рода.

Охваченный данным исследованием регион Северной Евразии ограничен с юга 42⁰ с. ш. и включает в себя Россию, страны Скандинавского полуострова и Прибалтийского региона, Украину, Белоруссию, Казахстан, Монголию и север Китая. В биоклиматическом отношении регион Северной Евразии охватывает широкий спектр типов экосистем бореальной и умеренной зон планеты, среди которых наиболее представительными являются арктическая пустыня и тундра, таежные и широколиственные леса, болота, степи и пустыни, сельскохозяйственные земли. Регион вызывает большой исследовательский интерес в связи с необходимостью лучшего понимания масштабов и факторов динамики наземных экосистем в условиях глобального изменения климата и возрастающего антропогенного воздействия и находится в фокусе интереса долгосрочной международной исследовательской программы NEESPI [25].

На основе проведенных исследований и разработок создана автоматическая информационная технология, обеспечивающая получение оценок пройденных огнем площадей на регулярной основе, что позволяет создать обновляемый банк данных долгосрочных наблюдений за воздействием пожаров на наземные экосистемы Северной Евразии. Разработанная технология входит составной частью в систему мониторинга лесных пожаров [18, 24, 26, 27] службы авиационной охраны лесов «Авиалесоохрана» Министерства природных ресурсов РФ.

Валидация разработанного метода картографирования поврежденных пожарами экосистем, выполненная с использованием репрезентативного набора спутниковых изображений высокого пространственного разрешения, а также выборочных авиационных и наземных обследований лесных гарей, продемонстрировала высокую точность получаемых оценок площадей повреждений [23].

Обзор ранее опубликованных оценок площадей повреждений растительности пожарами в Северной Евразии

Исторически первые и, до настоящего времени, наиболее продолжительные во времени регулярные оценки повреждений экосистем пожарами в Северной Евразии относятся к лесным территориям и получаются соответствующими лесными службами стран региона. В частности, в России оценка площадей пройденных пожарами в лесах выполняется службой охраны лесов «Авиалесоохрана» и соответствующие данные доступны начиная с 1965 года [11]. Эти же данные составляют основу официальной статистической отчетности о повреждениях лесов пожарами на национальном уровне. Вместе с тем, с точки зрения вовлечения этих данных в ресурсные и экологические исследования, они имеют ряд существенных ограничений. К ограничениям такого рода можно отнести неполный охват территории России, преимущественная приуроченность к покрытым лесом территориям, отсутствие картографических данных о границах поврежденных участков, временная и пространственная неоднородность, а также неопределенность уровня достоверности данных, вызываемая множеством факторов технического, экономического и субъективного характера. По информации ряда исследователей [7, 13, 28], в том числе и по результатам настоящей работы, можно сделать вывод о том, что, данные официальной статистики существенно недооценивают масштабы повреждений и многократно отличаются от оценок, полученных с использованием спутниковых данных.

Возможности использования спутниковых данных для картографирования повреждений лесов пожарами начинали исследоваться еще в 70-х и 80-х годах прошлого столетия [29, 30]. Эти исследования получили импульс развития с запуском спутников серии NOAA, имеющих на борту радиометр AVHRR, что объясняется удачно выбранными для мониторинга активных пожаров спектральными каналами прибора, а также возможностью глобальных наблюдений с частотой от 2 до 6 раз в сутки, в зависимости от числа действующих спутников. Исследования были направлены, как на разработку методов детектирования действующих пожаров по аномально высоким для земной поверхности значениям температуры [13, 31, 32, 33], так и на выявление поврежденной огнем растительности на основе использования спектральных признаков, в частности, нормализованного разностного индекса растительности NDVI [34, 35]. В некоторых работах был применен комбинированный подход [36], то есть результаты выявления по спектральным признакам

повреждений растительности объединялись с данными детектирования температурных аномалий с целью повышения достоверности получаемых результатов.

За предыдущие годы был получен и опубликован ряд оценок пройденных пожарами площадей, полученных для всей территории России по данным радиометра NOAA-AVHRR преимущественно с использованием техники детектирования активных пожаров на основе температурных аномалий [7, 13, 19]. По результатам, полученным на основе данных детектирования активных пожаров и дополнительных материалов, с целью компенсации погрешностей, связанных с не полным покрытием территории данными NOAA-AVHRR и не отдетектированными пожарами, поврежденная пожарами площадь территории России в 1998 году составила $13,3 \cdot 10^6$ га [7]. Похожие оценки площадей повреждений получены на территории России и другими авторами, а именно $11,0 \cdot 10^6$ га и $5,14 \cdot 10^6$ га [19], а также $11,49 \cdot 10^6$ га и $5,43 \cdot 10^6$ га [13] для 1998 и 1999 годов соответственно. Близость получаемых оценок во всех трех случаях объясняется использованием того же самого набора спутниковых данных и схожестью использованных алгоритмов детектирования активных пожаров. Имеющиеся оценки поврежденных площадей за период 1996-2002 годов также полученные преимущественно на основе детектирования активных пожаров по данным NOAA-AVHRR, из которых следует, что в среднем за указанный период на территории России пожарами повреждалось около $7,7 \cdot 10^6$ га [13]. При этом межгодовые вариации повреждений на основе этих данных характеризуются интервалом от $1,54 \cdot 10^6$ га (1997 год) до $12,14 \cdot 10^6$ га (2002 год).

Вместе с тем, известно, что использованный подход к оценке площадей повреждений пожарами по данным NOAA-AVHRR на основе детектирования температурных аномалий имеет ряд существенных ограничений [37]. В частности, при использовании данного подхода существуют факторы ведущие к завышению оценок площадей повреждений за счет небольших пожаров (менее 1 км^2), в тех случаях когда радиационная температура поверхности превышает заданный алгоритмом порог, а также многократного включения в оценку одного и того же участка горения при повторных наблюдениях за счет относительно невысокой точности географической привязки спутниковых данных. С другой стороны существует высокая вероятность пропусков поврежденных участков за счет ограниченной чувствительности сенсора, маскирующего влияния облачного покрова, а также ограниченной частоты спутниковых наблюдений [37, 38].

Другая заслуживающая внимания оценка для территории Северной Евразии получена в рамках проекта GBA2000 [39] по глобальному картографированию повреждений растительности пожарами в 2000 году на основе данных прибора Vegetation со спутника SPOT-4. При этом использовалась временная серия ежедневных наблюдений, а в основу алгоритма обработки данных для территории Северной Евразии [40] был положен анализ внутригодовых изменений значений набора спектральных признаков, полученных по измерениям отраженного излучения в видимом, ближнем и среднем инфракрасных диапазонах. По результатам выполнения проекта была сформирована глобальная база данных поврежденной огнем растительности в 2000 году, отражающая ежемесячную динамику повреждений с пространственным разрешением $1,15 \text{ км}$. Согласно полученным проектом GBA2000 оценкам, в 2000 году в России пройденная огнем площадь на лесных территориях составила $12,12 \cdot 10^6$ га.

Данные SPOT-Vegetation в виде стандартных десятидневных композитных продуктов S10 были использованы в проекте, выполненном Отделом географии Лондонского королевского колледжа, для оценки повреждений пожарами на территории России в 2001 году [15]. Алгоритм выявления повреждений основывался на анализе внутригодовой динамики значений спектрального отражения и использовании набора разностных критериев для различных спектральных каналов. Измеренная по данным SPOT-Vegetation площадь повреждений была дополнительно скорректирована на основе использования ограниченного набора изображений Landsat-ETM+ с тем, чтобы учесть не выявленные из-за недостаточного разрешения Vegetation относительно небольшие по размеру участки повреждений. Полученная по результатам исследования оценка площади повреждений для всей территории России составила $5,14 \cdot 10^6$ га, а для покрытой лесом территории $3,85 \cdot 10^6$ га.

В рамках проекта GLOBSCAR [41] с использованием данных прибора ATSR-2 со спутника ERS-2 была получена глобальная карта повреждений пожарами за 2000 год. Метод детектирования предусматривал комбинацию результатов двух алгоритмов, один из которых основан на анализе значений пикселей в двумерном пространстве признаков ближнего инфракрасного и термального диапазонов, а второй на использовании набора фиксированных порогов и данных измерений в четырех спектральных каналах. Полученная для территории России оценка площади повреждений составила $20,0 \cdot 10^6$ га, в том числе $4,01 \cdot 10^6$ га на покрытой лесом территории.

Таким образом, к настоящему времени с использованием спутниковых данных получен ряд оценок и баз данных, отражающих масштабы повреждений растительности огнем на территории России и Северной Евразии в различные годы. Сравнительный анализ полученных из различных ранее опубликованных источников оценок площадей повреждений за период 2000-2002 годов может быть проведен с использованием данных, приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение ранее опубликованных данных о площадях повреждений растительности пожарами на территории России в 2000–2002 годах (10⁶ га)

Год	Sukhinin et al., 2003 [13]	Soja et al., 2003 [19]	GBA2000 Grégoire et al., 2003 [39]	GLOBSCAR Simon, 2002 [41]	Zhang et al., 2003 [15]		Davidenko and Eritsov, 2003 [42]
	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
2000	9,71	7,05	12,12	20,00	-	-	1,64
2001	7,56	-	-	-	5,15	3,85	1,23
2002	12,14	-	-	-	-	-	1,83

Примечание: В таблице приняты следующие обозначения площадей:

a – повреждения во всех типах экосистем

b – повреждения только на покрытой лесом территории

c – повреждения только на охраняемой от пожаров территории лесного фонда России

Очевидно, что для некоторых из полученных оценок прямое сравнение неправомерно, поскольку они характеризуют различные территории или различную совокупность экосистем. То есть, отдельные оценки относятся ко всей территории России, в то время как другие получены только для лесной территории или даже, как данные официальной статистики [42], только к охраняемой ее части. В то же время, оценки, для которых такое сравнение кажется правомерным, также отличаются весьма существенно. В частности, относительные различия оценок площади повреждений в 2000 году во всех типах экосистем по данным трех исследований [13, 19, 41] лежат в диапазоне примерно от 38% до 184%. Различия двух опубликованных оценок площади повреждений пожарами в 2001 году [13, 15] составляют около 47%.

Причины расхождений в оценках могут иметь различную природу, но в обобщенном виде они могут быть классифицированы на следующие пять категорий:

- различия в характеристиках систем спутниковых наблюдений;
- различия в используемых наборах или типах производных продуктов спутниковых данных;
- различия в используемых методах и алгоритмах выявления поврежденных пожарами участков по спутниковым данным;
- различия в принятых определениях и вспомогательных данных для анализа принадлежности пожаров к типам растительного покрова;
- различия, связанные с наличием этапа дополнительной коррекции оценок площадей повреждений для учета ограничений пространственного разрешения или неполноты покрытия территории данными спутниковых наблюдений и методами указанной коррекции.

При анализе информационных продуктов, отражающих повреждения растительности пожарами, важно учитывать, наряду с возможностью получения достоверных интегральных оценок площадей, также и другие аспекты их использования. В частности, необходим анализ уровня достоверности оценок повреждений в различных типах экосистем, так как повреждена в различных типах растительного покрова могут выявляться с различной степенью точности. Кроме того важной характеристикой информационных продуктов при анализе сезонной динамики развития повреждений является уровень их временного разрешения.

Используемые спутниковые данные и методология выявления повреждений

Подробное описание алгоритма детектирования пройденных огнем площадей по спутниковым данным приводится в статье [21] настоящего сборника, в то время как настоящий раздел ограничивается рассмотрением общих методологических принципов и подходов, разработанных и использованных в рамках данного исследования.

Выявление повреждений экосистем пожарами по спутниковым данным, как было указано выше, может основываться на использовании двух принципиально различных подходов, а именно на детектировании участков, спектральные отражательные свойства которых претерпели характерные для воздействия огня изменения, на поиске участков в которых наблюдались аномально высокая температура, а также на комбинации обоих указанных подходов. При этом детектирование повреждений по изменениям спектральных отражательных характеристик поверхности предполагает использование временных серий данных спутниковых наблюдений для поиска участков с характерными внутригодовыми или межгодовыми изменениями, на основе заданных критериев распознавания.

Совокупное использование современных спутниковых систем наблюдения Земли в частности, таких как NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation, Terra/Aqua-MODIS, создает возможность получения многолетних временных серий данных об оптических свойствах поверхности, включая компоненты отраженного и

собственного излучения, последняя из которых, в значительной степени определяется температурой наблюдаемых объектов. С учетом указанных предпосылок нами был принят подход по выявлению поврежденных пожарами на основе комбинированного использования временных серий данных, как об отражательных, так и о температурных свойствах поверхности, получаемых спутниковыми приборами SPOT-Vegetation и Terra/Aqua-MODIS.

Инструмент SPOT-Vegetation призван обеспечить глобальные непрерывные наблюдения за состоянием растительного покрова планеты (VEGETATION portal: <http://www.spot-vegetation.com>) и имеет существенные преимущества для решения этой задачи по сравнению с такими, активно используемыми в аналогичных приложениях сенсорами, как NOAA-AVHRR и ERS-ATSR. Эти преимущества обусловлены, в частности, наличием оптимизированных для наблюдения растительности спектральных диапазонов, обеспечением точной радиометрической калибровки измерений, геометрической точностью получаемых изображений и высоким уровнем постоянства величины пространственного разрешения при изменении угла визирования. Инструмент SPOT-Vegetation имеет пространственное разрешение 1.15 км (при наблюдении в надири) и следующие спектральные каналы: 0.43 – 0.47 мкм; 0.61 – 0.68 мкм; 0.78 – 0.89 мкм; 1.58 – 1.75 мкм. В настоящей работе использованы данные продуктов S10 за период 1999-2003 годов на территорию ограниченную географическими координатами 5⁰ в.д.–180⁰ в.д. и 42⁰ с.ш.–75⁰ с.ш.

В качестве источника дополнительной информации использовались результаты детектирования активных пожаров по температурным аномалиям с использованием спутниковых изображений Terra/Aqua-MODIS, а именно стандартные продукты MOD14 (версия алгоритма 4.0) [43]. Для проведения экспериментальных работ была создана база подекадно агрегированных данных о температурных аномалиях на территорию Северной Евразии за период 2000-2003 годов согласованных по пространственному разрешению и времени наблюдения с продуктами S10 SPOT-Vegetation.

Информация о типах поврежденных экосистем имеет ключевой характер и необходима как для решения задач управления природными ресурсами (например, лесное хозяйство), так и для исследования процессов взаимодействия экосистем и климата. В настоящей работе в качестве источника информации о географическом распределении различных типов экосистем в регионе была использована, созданная в рамках проекта GLC 2000, карта наземных экосистем Северной Евразии [44]. Карта получена по данным SPOT-Vegetation и отражает состояние экосистем исследуемого региона по состоянию на 2000 год. Легенда карты включает в себя 27 тематических классов, выбранных с учетом требований экологической оценки лесов, тундры, кустарниковых и травяных типов растительного покрова, водно-болотных комплексов, а также не покрытых растительностью земель. Оценка повреждений пожарами проводилась на основе производной версии карты, полученной перегруппировкой и объединением ряда тематических классов исходной карты в более агрегированные классы экосистем (таблица 2). Производная карта отличается упрощенной, по отношению к исходной карте, легендой, выбранной исходя из стремления получения оценок воздействия пожаров на леса, тундру, болотные экосистемы, а также на экосистемы с доминированием травяной и кустарниковой растительности.

Воздействие огня, в зависимости от интенсивности пожара и типов экосистем, может приводить к гибели или изменению физиологических характеристик растительности, что, в частности, выражается в снижении влагосодержания и концентрации хлорофилла в зеленых фракциях растений. При этом также изменяется и спектральное отражение поврежденных участков в диапазонах длин волн, в которых происходит наиболее интенсивное поглощение оптического излучения молекулами хлорофилла и воды, а именно в ближнем и среднем ИК спектральных диапазонах. Знание этих особенностей положено в основу использования спектрального вегетационного индекса SWVI (Short Wave Vegetation Index), вычисляемого по данным соответствующих спектральных каналов SPOT-Vegetation [14].

Поскольку сезонные различия уровня детектируемости участков повреждений зависят от фенологического состояния растительного покрова и его спектрально-отражательных свойств, возможности выявления поврежденных огнем участков не одинаковы в различных типах экосистем в различные сезоны года. Проведенные нами исследования позволили количественно оценить эти различия при использовании данных SPOT-Vegetation для картографирования поврежденных огнем участков в различных типах лесных насаждений. На основе имеющихся карт лесов и наземных экосистем Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation была исследована фенологическая динамика спектрально-временных характеристик различных типов леса в сравнении со спектральными сигнатурами поврежденных в различной степени пожарами лесов. Анализ результатов проведенных исследований и сделанные на его основе выводы были положены в основу алгоритма детектирования повреждений растительности пожарами, который предусматривает межгодовое сравнение значений вегетационного индекса SWVI для соответствующих декад данного и предыдущего года, а также использование набора разработанных критериев, подробное описание которых приведено в статье [21] настоящего сборника.

Таблица 2. Соответствие классов исходной и производной карт наземных экосистем Северной Евразии

Классы исходной карты	Классы производной карты
Леса	
Хвойные вечнозеленые леса	Хвойные вечнозеленые леса
Хвойные листопадные леса	Хвойные листопадные леса
Лиственные леса	Лиственные леса
Хвойно-лиственные леса	Смешанные леса
Лиственно-хвойные леса	
Смешанные леса	
Леса в комплексе с другой естественной растительностью	
Кустарники	
Хвойные вечнозеленые кустарники	Кустарники
Лиственные кустарники	
Увлажненные земли	
Болота	Болота и увлажненные земли
Грядово-мочажинные болотные комплексы	
Прибрежная травяно-кустарниковая растительность	
Травянистая растительность	
Луга	Травянистая растительность
Степи	
Тундра	
Полярная тундра	Тундра
Кустарничковая тундра	
Травянистая тундра	
Кустарниковая тундра	
Сельскохозяйственные земли и комплексы	
Сельскохозяйственные земли	Сельскохозяйственные земли
Сельскохозяйственные земли в комплексе с лесами	
Сельскохозяйственные земли в комплексе с лугами	
Непокрытые растительностью земли	
Лесные гари предыдущих лет*	Непокрытые растительностью земли
Пустыня и гольцы	
Вечные снега и льды	
Реки и внутренние водоемы	
Урбанизированные территории	
Солончаки	

(*) Примечание к таблице 2: Класс «лесные гари предыдущих лет» содержит участки погибшего в результате воздействия пожаров леса и представлен относительно свежими (3-5 летней давности на момент проведения спутниковой съемки в 1999-2000 годах) гарями, на которых возобновление лесной растительности еще не достигло стадии сомкнутости покрова, доступной для регистрации по спутниковым изображениям.

База данных о повреждениях растительного покрова Северной Евразии пожарами

Сформированная по результатам обработки спутниковых изображений база данных о повреждениях растительного покрова Северной Евразии в настоящее время охватывает период 2000-2003 годов и планируется, что она будет регулярно дополняться по мере поступления и обработки данных спутниковых наблюдений. Пространственное разрешение данных о площадях повреждений составляет 1,15 км при десятидневной временной дискретности, что соответствует характеристикам продуктов S10 SPOT-Vegetation. Представленная на рис. 1 карта получена с использованием указанной базы данных и отражает пространственное распределение пройденных пожарами площадей на территории Северной Евразии за весь доступный к моменту подготовки публикации период наблюдений. База данных доступна для пользователей в виде набора растровых файлов нескольких различных форматов (ERDAS Imagine, ESRI GRID и бинарный формат) с тем, чтобы обеспечить высокий уровень гибкости в выборе программного обеспечения для анализа данных. Внешний доступ пользователей Internet к базе данных осуществляться через web-сайт по адресу <http://tem.iki.rssi.ru> с использованием специально разработанных программных инструментов, предоставляющих широкие возможности осуществления выборки данных с представлением результатов в табличной или графической форме. При этом пользователям предоставляется возможность получения данных по отдельным странам региона Северной Евразии или субъектам Российской Федерации в разрезе различных типов наземных экосистем. Кроме того, имеется возможность анализа сезонной и межгодовой динамики повреждений с учетом политико-административного деления региона и типов экосистем. Более подробная ин-

формация о базе данных и возможностях системы доступа к данным представлена в работе [22], помещенной в настоящем сборнике.

Площади и сезонная динамика повреждений в различных типах экосистем

Данные о площадях повреждений пожарами для ряда стран и политико-административных регионов Северной Евразии в 2000-2003 годах, полученные с использованием разработанной базы данных, представлены в таблице 3. Принадлежность повреждений различным типам экосистем устанавливалась на основе производной карты наземных экосистем Северной Евразии, описание легенды которой представлено в таблице 2.

Анализ полученных оценок площадей растительности поврежденной пожарами в 2000-2003 годах позволяет, в частности, сделать следующие заключения:

- Повреждения пожарами на территории Северной Евразии сильно варьируют, как по масштабам, так и по географической приуроченности. За период наблюдений наименьшие ($8808,0 \cdot 10^3$ га) и наибольшие ($41657,1 \cdot 10^3$ га) по площади повреждения произошли соответственно в 2000 и 2003 годах. Сезон 2003 года отличался экстремально большими масштабами повреждений, по-видимому, существенно превышающими характерные для региона Северной Евразии средние величины. Повреждения наземных экосистем Северной Евразии в 2003 году имели площадь, превосходящую по площади повреждения 2001 и 2002 годов соответственно в 4.6 и 3.3 раза, а при рассмотрении повреждений только лесных экосистем указанные превышения соответственно составили 8.4 и 3.7 раза;
- В Северной Евразии наибольшие повреждения претерпевают лесные и травяные экосистемы. Площадь их повреждений существенно превышает повреждения во всех других типах экосистем, а совокупная доля лежит в интервале 88-91% от суммарной площади поврежденных наземных экосистем всех типов. При этом соотношение между площадями повреждений лесов и травяного покрова от года к году существенно варьирует. Так, в 2001 году максимальные по площади повреждения произошли в классе травяной растительности, и ее доля была равна 60%, в то время как в 2003 году этот показатель составил 31%;
- Среди различных типов лесных экосистем, наибольшие по площади повреждения выявлены в лиственных лесах (класс хвойных листопадных лесов), на долю которых в различные годы приходится от 65% до 78% от общей площади лесов Северной Евразии, поврежденных пожарами;
- Наибольшая доля повреждений наземных экосистем Северной Евразии пожарами приходится на территорию России и составляет 60-83%, а при рассмотрении только лесов эта доля возрастает до 91-97%;
- Повреждения пожарами тундровых экосистем составляют 2-3%, а болот (класс увлажненных земель) – 3-4% от совокупной площади повреждений экосистем всего исследуемого региона.

Интерес представляет также исследование сезонной динамики воздействия пожаров на наземные экосистемы различных типов в различные годы. В частности, представленные на рис. 2 графики, отражают сезонную динамику воздействия пожаров на растительный покров тундр, лесов, степей и болот Северной Евразии. Их анализ позволяет судить о периодах максимального воздействия пожаров и продолжительности пожарных сезонов различных лет в экосистемах различных типов, а также оценивать соотношение масштабов повреждений в различные годы.

Из анализа графиков сезонной динамики можно видеть, что пожарный сезон 2003 года отличался от сезонов 2000-2002 годов не только экстремально большими масштабами воздействия пожаров на регион Северной Евразии, но и наибольшей его продолжительностью в тундровых, лесных и степных экосистемах. Так, в 2003 году существенные по площади повреждения лесов пожарами появились уже в апреле, что на два месяца раньше по отношению к сезону 2002 года и на три месяца по отношению к сезону 2001 года. Максимальные повреждения лесов пожарами произошли в июне 2003 года и составили около 65% от общей площади повреждений лесов в течение года. Этому же месяцу соответствуют и максимальные повреждения пожарами болот в 2003 году, которые охватили в июне около 45% площади всех подверженных воздействию огня болот в данном году. Максимальные повреждения тундровых экосистем произошли в августе 2003 года и были выявлены на площади около $958,4 \cdot 10^3$ га.

Хотя наибольшее за период наблюдений значение интегральной площади пройденных огнем степей было выявлено в сезоне 2003 года, экстремально большое за месячный период воздействие огня на степные экосистемы наблюдалось в августе 2001 года и составило около 63% от площади степей, пройденных пожарами в течение данного года.

Безусловно, приведенными выше выводами возможности анализа сезонной и межгодовой динамики повреждений далеко не ограничиваются. Созданная в рамках данной работы база данных представляет собой основу для проведения разноплановых научных исследований географических и временных закономерностей воздействия огня на наземные экосистемы Северной Евразии.

Заключение

Выполненные исследования позволили разработать метод и автоматическую технологию, позволяющую на регулярной основе картографировать по спутниковым данным повреждения наземных экосистем Северной Евразии пожарами. Разработанный метод основан на совместном использовании временных серий данных спутниковых наблюдений SPOT-Vegetation и Terra/Aqua-MODIS и использует комбинацию спектральных признаков для выявления межгодовых изменений в состоянии растительности и результатов детектирования действующих пожаров по аномально высокой температуре поверхности. Используемый методологический подход на взгляд авторов позволяет добиться высокого уровня достоверности и точности выявления поврежденной пожарами растительности, что подтверждается результатами первого этапа валидации, выполненной с использованием репрезентативного набора изображений высокого разрешения. Сформированная с использованием разработанной технологии база данных представляет собой, по мнению авторов, наиболее, в настоящее время, полный и достоверный набор данных о повреждениях огнем растительного покрова Северной Евразии, охватывающий на данном этапе период 2000-2003 годов и предполагаемый к дальнейшему дополнению по мере поступления и обработки спутниковых данных. Полученные данные впервые дают возможность объективно судить о пространственно-временных характеристиках повреждений растительности пожарами для всей территории Северной Евразии за относительно продолжительный период при декадной частоте наблюдений, что позволяет достаточно детально анализировать сезонную динамику пожаров в различных типах наземных экосистем.

База данных может найти широкое применение для решения задач устойчивого управления природными, и, прежде всего лесными, ресурсами, охраны окружающей среды и исследований, связанных с глобальными изменениями климата. В частности, использование разработанной базы данных в комбинации с дополнительной информацией позволит оценивать объемы эмиссий углерода в атмосферу в результате пожаров и может рассматриваться как один из важнейших элементов информационного обеспечения, необходимого для выполнения Россией обязательств в соответствии с условиями Киотского протокола к рамочной конвенции ООН по изменению климата.

Литература

1. Исаев А.С., Г.Н. Коровин, В.И. Сухих, С.П. Титов, А.И. Уткин, А.А. Голуб, Д.Г. Замолотчиков, А.А. Пряжников. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России (аналитический обзор). Центр экологической политики России, Москва, 1995, 156 с.
2. Kasischke, E.S., & Stocks, B.J. (2000). *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*. New York: Springer-Verlag.
3. French, N. H. F., E. S. Kasischke, B. J. Stocks, J. P. Mudd, D. L. Martell, and B. S. Lee (2000), Carbon release from fires in the North American boreal forest, in *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*, edited by E. S. Kasischke and B. J. Stocks, pp. 377–388, Springer-Verlag, New York.
4. Folland, C.K., Karl, T.R., Christy, J.R., Clarke, R.A., Gruza, G.V., Jouzel, J., Mann, M.E., Oerlemans, J., Salinger, M.J. and Wang, S.-W., 2001b: Observed Climate Variability and Change. pp. 99-181 In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C.A. Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881pp.
5. Коровин Г.Н., Зукерт Н.В. Влияние климатических изменений на лесные пожары в России // В кн.: Климатические изменения: взгляд из России, ред. В.И. Данилов-Данилян, М.: ТЕИС, 2003, стр. 69-98
6. Kasischke, E.S., Christensen, N.L., Jr. and B.J. Stocks. 1995. Fire, global warming, and the carbon balance of boreal forests. *Ecol. Appl.* 5, 437-451.
7. Conard S.G., Sukhinin, A.I., Stocks, B.J., Cahoon, D.R., Davidenko, E.P., & Ivanova, G.A. (2002). Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia. *Climatic Change*, 55, 197-211.
8. Isaev, A.S., Kоровин, G.N., Bartalev, S.A., D. Ershov, A. Janetos, Kasischke, E.S., Shugart, H.H., French, N.H., Orlick, B.E., and T.L. Murphy, 2002, Using remote sensing to assess Russian forest fire carbon emissions, *Climate Change* 55(1-2), 235-249, 2002
9. Seiler, W., and P. J. Crutzen, 1980, Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning, *Climate Change*, 2, 207– 247.
10. Stocks B.J., 1991, The extent and impact of forest fires in northern circumpolar countries, *Global biomass burning: atmospheric, climatic, and biospheric implications*, J.S. Levine (editor), the MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England.
11. Коровин Г.Н., Андреев Н.А. Авиационная охрана лесов, М.: Агропромиздат, 1988, 233 С.
12. Eva, H., and E. F. Lambin (1998), Burnt area mapping in central Africa using ATSR data, *Int. J. Remote Sens.*, 19, 3473–3497.
13. Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S., Hewson J.H, Soja A.J., Csiszar I.A., Hyer E.J., Loboda T., Conard S.G., Romasko V.I., Pavlichenko E.A., Miskiv S.I. and Slinkina O.A., 2003, Satellite-based Mapping of Fires in Russia: New Products for Fire Management and Carbon Cycle Studies. Submitted to *Remote Sensing of Environment*

14. Fraser, R. H., Li, Z., & Landry, R. (2000). SPOT VEGETATION for characterising boreal forest fires. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 3525–3532
15. Zhang Y.-H., M.J. Wooster, O. Tutubalina, G.L.W. Perry, 2003, Monthly burned area and forest fire carbon emission estimates for the Russian Federation from SPOT VGT, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 87, Issue 1, pp. 1–15
16. Arino, O., et al., 2001. Mapping of burned surfaces in vegetation fires, in *Global and Regional Vegetation Fire Monitoring From Space: Planning and Coordinated International Effort*, edited by F. Ahern, J. G. Goldammer, and C. Justice, pp. 227–255, SPB Acad., The Hague
17. Tansey, K., Grégoire, J.-M., Stroppiana, D., Sousa, A., Silva, J.M.N., Pereira, J.M.C., Boschetti, L., Maggi, M., Brivio, P.A., Fraser, R., Flasse, S., Ershov, D., Binaghi, E., Graetz, D. and Peduzzi, P. 2004. Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, VOL. 109, D14S03, doi:10.1029/2003JD003598, 2004.
18. Коровин Г.Н., Барталев С.А., Беляев А.И. Интегрированная система мониторинга лесных пожаров // *Лесное хозяйство*, №4, 1998, с. 45-48
19. Soja, A.J., Sukhinin, A., Jr., D.R.C., Shugart, H.H., & Jr., P.W.S. (2003). AVHRR-derived fire frequency, distribution, and area burned in Siberia. *International Journal of Remote Sensing*, (in press).
20. Lavoué D., C. Lioussé, H. Cachier, B.J. Stocks, and J.G. Goldammer, Modeling of carbonaceous particles emitted by boreal and temperate wildfires at northern latitudes, *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, no. D22, 26,871-26,890, November 27, 2000.
21. Егоров В.А., Барталев С.А. Анализ временных серий спутниковых данных SPOT-Vegetation для детектирования повреждённой пожарами растительности Северной Евразии // Сборник научных статей Второй открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Институт космических исследований РАН, Москва, 16-18 ноября 2004г. (настоящий сборник)
22. Барталев С.А., Бурцев М.А., Лупян Е.А., Прошин А.А., Уваров И.А. Разработка информационной системы поддержки мониторинга состояния и динамики наземных экосистем Северной Евразии по данным спутниковых наблюдений // Сборник научных статей Второй открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Институт космических исследований РАН, Москва, 16-18 ноября 2004г. (настоящий сборник)
23. Барталев С.А., Беляев А.И., Егоров В.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Коршунов Н.А., Котельников Р.В., Лупян Е.А. Валидация результатов выявления и оценки площадей, поврежденных пожарами лесов по данным спутникового мониторинга Vegetation // Сборник научных статей Второй открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Институт космических исследований РАН, Москва, 16-18 ноября 2004г. (настоящий сборник)
24. Беляев А.И., Коровин Г.Н., Лупян Е.А. Использование спутниковых данных в системе дистанционного мониторинга лесных пожаров // Сборник научных статей Второй открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Институт космических исследований РАН, Москва, 16-18 ноября 2004 г. (настоящий сборник)
25. Исаев А.С., Барталев С.А., Гройсман П.Я., Георгиади А.А., Диринг Д., Шугарт Х.Х. Научный план международной партнерской инициативы в области наук о Земле в регионе Северной Евразии NEESPI // Сборник научных статей Второй открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Институт космических исследований РАН, Москва, 16-18 ноября 2004 г. (настоящий сборник)
26. Абушенко Н.А., Барталев С.А., Беляев А.И., Ершов В.В., Коровин Г.Н., Кошелев В.В., Лупян Е.А., Крашенинникова Ю.С. Мазуров А.А., Минько Н.П., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В. Система сбора, обработки и доставки спутниковых данных для решения оперативных задач службы пожароохраны лесов России. *Наукоёмкие технологии*. 2000. т. 1., №2, 4-18 с.
27. Bartalev, S.A., V.V. Ershov, E. Loupian, Yu.S. Krasheninnikova, A. Mazurov, N.P. Minko, R. Nazirov, A. Proshin, E. Flitman, 2001, System for Satellite Data Collection, Processing and Distribution for Support of Operations of Russian National Forest Fire Protection Agency // *In the Proceedings of 4th International Symposium on "Reducing the Cost of Spacecraft Ground Systems and Operations"*, April 24 - 27, 2001, The Johns Hopkins University / Applied Physics Laboratory Laurel, Maryland, USA
28. Csizsar, I., C.O. Justice, A.D. Mcguire, M.A. Cochrane, D.P. Roy, F. Brown, S.G. Conard, P.G.H. Frost, L. Giglio, C. Elvidge, M.D. Flannigan, E. Kasischke, D.J. McCrae, T.S. Rupp, B.J. Stocks, and D.L. Verbyla. 2004. Land Use And Fires. Pp. 329-350 in *Land Change Science: Observing, Monitoring, and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface* (Gutman et al. eds). Kluwer Academic Publishers.
29. Арцыбашев Е.С. и др. Применение спутниковой информации в охране леса от пожаров.: Л., 1977, 27 с.
30. Сухих В.И. Дистанционные методы в лесном хозяйстве и охране природы. "Лесное хозяйство", 1979, № 3, с. 41-45.
31. Барталев С.А., Коровин Г.Н., Шлапак Б.В. Оценка распознаваемости лесных пожаров по данным радиометра AVHRR спутников серии NOAA // *Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования*, Выпуск II, 8-12 декабря 1997, Москва, с. 22-25.
32. Cahoon, D.R., Jr., Stocks, B.J., Levine, J.S., Cofer, W.R., III, & Chung, C.C. (1992). Evaluation of a technique for satellite-derived area estimation of forest fires. *Journal of Geophysical Research*, 97, 3805-3814.
33. Justice, C.O., Kendall, J.D., Dowty, P.R., & Scholes, R.J. (1996). Satellite remote sensing of fires during the SAFARI campaign using NOAA advanced very high resolution radiometer. *Journal of Geophysical Research*, 101, 23851-23863.
34. Kasischke, E. S., French, N. H. F., Harrell, P., Christensen Jr., N. L., Ustin, S. L., & Barry, D. (1993). Monitoring of wildfires in boreal forests using large area AVHRR NDVI composite data. *Remote Sensing of Environment*, 44, 51–71.
35. Gutman, G., S. Bartalev, G. Korovin Delineation of large fire damage areas in boreal forests using NOAA AVHRR measurements// *Advances in Space Research*, Vol. 15, Issue: 11, 1995, pp. (11) 111 - (11) 113

36. Fraser, R. H., Li, Z., & Cihlar, J. (2000). Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): A new technique for burned area mapping over boreal forest. *Remote Sensing of Environment*, 74, 362–376
37. Boles, S.H., & Verbyla, D.L. (2000). Comparison of three AVHRR-based fire detection algorithms for interior Alaska. *Remote Sensing of Environment*, 72, 1-16.
38. Flannigan, M.D., & Vonder Haar, T.H. (1986). Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR. *Canadian Journal of Forest Research*, 16, 975-982.
39. Grégoire, J.-M., Tansey, K., & Silva, J.M.N. (2003). The GBA2000 initiative: Developing a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1369 - 1376.
40. Ershov D.V., and V.P. Novik, 2001, Features of burnt area mapping in forest of Siberia using SPOT S1-VGT data, *GOFCC Fire Satellite Product Validation Wordkhop*, Lisbon, July 9-11 2001.
41. Simon, M. (2002). *GLOBSCAR Products Qualification Report*. ESA-ESRIN, Frascati, Italy.
42. Davidenko, E.P., & Eritsov, A. (2003). Russian Federation Fire 2002 Special Part II: The fire season 2002 in Russia Report of the aerial forest fire service *Availlesookhrana*. *International Forest Fire News*, 28
43. Justice, C. O, Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J. T., Roy, D., Descloitres, J., Alleaume, S., Petitcolin, F., and Kaufman, Y., 2002, The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 83:244-262.
44. Bartalev, S.A., A.S. Belward, D. V. Erchov, and A. S. Isaev, 2003, A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, No. 9, 1977 – 1982

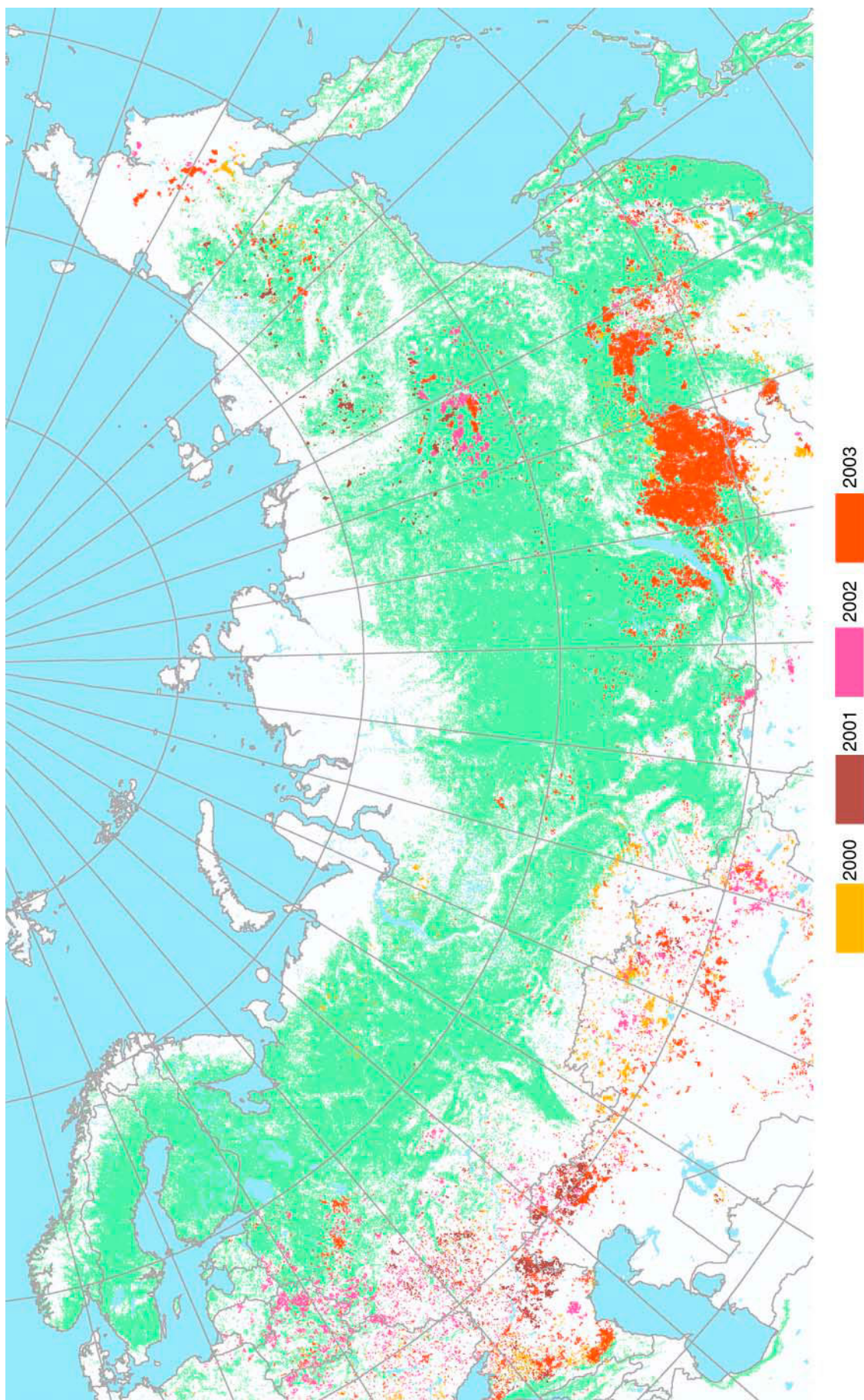


Рис. 1. Карта повреждений растительности Северной Евразии пожарами в 2000-2003 годах

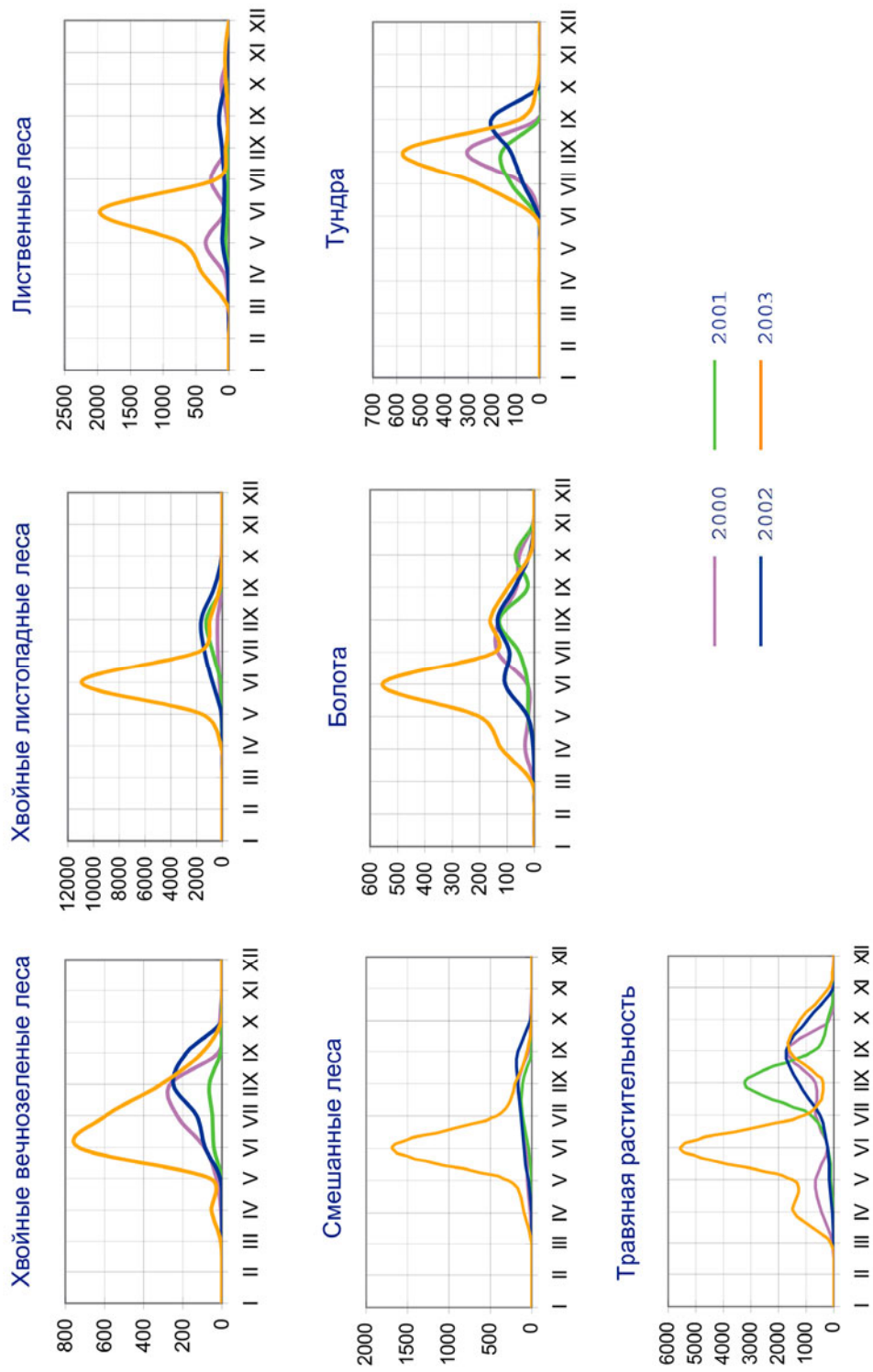


Рис. 2. Сезонная динамика повреждений различных типов наземных экосистем Северной Евразии пожарами в период 2000-2003 гг.