

# **АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ СЕРИЙ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ SPOT-VEGETATION ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОЖАРАМИ БОРЕАЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ**

**В.А. Егоров, С.А. Барталев**

*Институт космических исследований РАН,  
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32  
Tel.: (095) 333-53-13; E-mail: egorov@smis.iki.rssi.ru*

Пожары в бореальных экосистемах относятся к числу наиболее мощных факторов воздействия на растительный покров, а данные о масштабах этого явления необходимы для управления природными ресурсами и исследования процессов глобального изменения климата. Использование данных дистанционного зондирования Земли со спутников открывает возможности регулярной оценки площадей и характеристик поврежденной огнем растительности на больших территориях, а данные прибора SPOT-Vegetation могут быть эффективно использованы для организации мониторинга на континентальном и глобальном уровнях. В статье дается анализ предпосылок и возможных подходов к использованию данных SPOT-Vegetation для мониторинга поврежденной пожарами растительности, а также описание разработанного алгоритма анализа спутниковых данных, положенного в основу автоматической технологии картографирования пройденных огнем площадей на регулярной основе. Метод картографирования поврежденной пожарами растительности бореальных экосистем основан на совместном использовании временных серий данных прибора SPOT-Vegetation и результатов детектирования действующих пожаров по температурным характеристикам, регистрируемым радиометром MODIS со спутников Terra и Aqua.

## **Введение**

Пожары в наземных экосистемах бореальной зоны являются важным естественным фактором их динамики, масштабы проявления которого сильно варьируют в пространстве и во времени, определяясь типами и характеристиками растительного покрова, меняющимися климатическими и метеорологическими условиями, а также возрастающим антропогенным влиянием. Наличие регулярно обновляемых данных о повреждениях растительности огнем является необходимым условием эффективного решения многих научных и прикладных задач, включая управление лесными ресурсами и пастбищными землями, охрану окружающей среды, моделирование климатических изменений. Использование спутниковых данных в настоящее время открывает практическую возможность организации мониторинга пожаров и оценки их последствий на больших территориях. Известны примеры использования спутниковых данных низкого и среднего пространственного разрешения, получаемых приборами NOAA-AVHRR [1, 2], SPOT-Vegetation [3-7], Terra/Aqua-MODIS [8] и ERS-ATSR [9] для картографирования поврежденной огнем растительности на континентальном и глобальном уровнях. Находят также широкое применение для получения локальных или региональных оценок изображения высокого пространственного разрешения, в частности, полученные прибором Landsat- ETM+ [10]. Вместе с тем, несмотря на многочисленные исследования и разработки методов спутникового картографирования поврежденной огнем растительности, в том числе и на глобальном уровне, для региона Северной Евразии до недавнего времени ощущался острый недостаток регулярно обновляемых и имеющих достаточный для практического использования уровень точности данных. Это послужило побудительным мотивом для описанных в настоящей статье разработок, проводимых в интересах развития действующей системы мониторинга лесных пожаров России и фундаментальных исследований динамики наземных экосистем и изменений климата в регионе Северной Евразии, основанных на использовании многолетних временных серий данных спутникового прибора SPOT-Vegetation в качестве основного источника спутниковых данных.

## **Анализ предпосылок и возможных подходов к использованию данных SPOT-Vegetation для мониторинга поврежденной пожарами растительности**

Установленный на спутниках SPOT-4/5 прибор Vegetation [11] обеспечивает ежедневные глобальные наблюдения Земли с пространственным разрешением 1,15 км в оптимизированных для наблюдения растительности спектральных каналах оптического диапазона длин волн:

- 0.43-0.47 мкм (*blue* - голубой канал);
- 0.61-0.68 мкм (*red* - красный канал);
- 0.78-0.89 мкм (*NIR* - ближний ИК канал);
- 1.58-1.75 мкм (*SWIR* - средний ИК канал).

Поставка данных SPOT-Vegetation пользователям производится в виде набора стандартных продуктов [11, 12], различающихся временными разрешениями, наличием этапа коррекции влияния атмосферы, различным уровнем фильтрации данных зашумленных наблюдений и приведением измерений спектральной яркости к стандартизованным геометрическим условиям освещения и наблюдения. В данных исследований были использованы так называемые стандартные продукты данных S10, содержащие значения спектрального отражения, выбранные по критерию максимальной величины NDVI на верхней границе атмосферы за десятидневный период наблюдений. Основной причиной обусловившей выбор продуктов S10 является наличие свободно доступного по сети Internet регулярно обновляемого долгосрочного архива данных SPOT-Vegetation [13], в котором указанные продукты представлены наиболее длинной многолетней временной серией данных.

В зависимости от типа экосистемы, вида пожара и его силы, воздействие огня находит непосредственное проявление в полном уничтожении зеленой биомассы или частичных повреждениях растительного покрова, в частности, сопряженных со снижением концентрации хлорофилла и водным стрессом. Это в свою очередь приводит к изменению оптических свойств растительного покрова и характеристик отраженного солнечного излучения. Последнее может выражаться в интегральном снижении альбедо поверхности во всей видимой области спектра за счет наличия на поверхности остаточных продуктов горения непосредственно после пожара, изменении соотношения между отражательной способностью в красном и ближнем ИК диапазонах длин волн в результате снижения концентрации хлорофилла в зеленых фракциях растений, а также повышении коэффициента отражения в среднем ИК диапазоне вследствие уменьшения влагосодержания в почве и растительности [2]. Это создает необходимые физические предпосылки для выявления поврежденной огнем растительности с использованием оптических приборов и методов дистанционного зондирования, регистрирующих отраженное земной поверхностью излучение в видимом, а также ближнем и среднем ИК диапазонах, к числу которых относится прибор SPOT-Vegetation.

Наряду с упомянутыми выше физическими предпосылками при разработке методов дистанционного мониторинга повреждений пожарами растительности необходимо учитывать, что возможности выявления поврежденных участков не одинаковы в различных типах экосистем в течение года, что в свою очередь определяется различной сезонной динамикой спектрально-отражательных свойств различных типов растительности в зависимости от их фенологического состояния. Проведенные нами исследования позволили оценить эти различия при использовании данных SPOT-Vegetation для картографирования поврежденных огнем участков в различных типах лесных насаждений. На основе имеющихся карт лесов и типов наземных экосистем были определены участки различных типов леса для исследования фенологической динамики спектрально-временных характеристик лиственницы, ели, дуба, берёзы и сосны (рис. 1) в сравнении со спектральными сигнатурами поврежденных пожарами лесов. Заметно, что в летний период различия максимальны, однако ранней весной, а также осенью, различия менее отчётливы, особенно для лиственничных и сосновых насаждений.

Кроме того, необходимо учитывать и тот факт, что наряду с пожарами к сходным изменениям спектрально-отражательных свойств растительного покрова может приводить воздействие и других возмущающих факторов, сопровождаемых угнетением или гибелью растительности, в частности таких как, болезни растений, засухи, промышленные загрязнения, вспышки массового размножения насекомых фитофагов. Вследствие этого весьма целесообразным представляется наличие и возможность использования дополнительной информации для отделения пройденных пожарами участков от повреждений, вызываемых другими факторами воздействия на растительность. Очевидно, что в качестве одного из возможных источников информации такого рода могут выступать данные об активных пожарах, детектируемых по аномально высокой для подстилающей поверхности температуре с использованием данных, получаемых, например, такими спутниковыми приборами, как NOAA-AVHRR и Terra/Aqua-MODIS.

При использовании спутниковых данных для картографирования растительности широко распространено использование спектральных вегетационных индексов, получаемых на основе комбинаций значений отраженного излучения измеренных в различных спектральных каналах. Так наиболее широко используемый для мониторинга растительности нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI [14], получаемый по данным наблюдений в красном и ближнем ИК каналах, проявляет существенное снижение своих значений после воздействия огня, как результат ухудшения состояния листовых пигментов и изменения листовой структуры. В то же время результаты многочисленных исследований демонстрируют [2, 5], что для выявления по спутниковым данным поврежденной огнем растительности наиболее эффективным является комбинация данных наблюдений в каналах ближнего и среднего ИК диапазонов, как следствие их высокой чувствительности к потере биомассы и снижения влагосодержания растительности после воздействия огня. Рассчитываемый на основе указанной комбинации спектральных каналов вегетационный индекс, впервые упомянутый в литературе [15] в качестве нормализованного разностного водного индекса NDWI, в исследованиях [4, 5] с использованием данных SPOT-Vegetation часто носит название коротковолнового вегетационного индекса SWVI и широко используется для изучения повреждений растительности огнем:

$$SWVI = \frac{R_{nir} - R_{swir}}{R_{nir} + R_{swir}} \quad (1)$$

где  $R_{nir}$  и  $R_{swir}$  – соответственно значения коэффициента отражения подстилающей поверхности, измеренные в ближнем и среднем ИК каналах SPOT-Vegetation.

SWVI в некоторой степени также является аналогом VI3 индекса [16] при использовании данных NOAA-AVHRR и индекса, предложенного применительно к использованию данных Landsat-TM [10].

К настоящему времени разработано довольно большое количество методов картографирования повреждений растительности пожарами на основе сравнения разновременных спутниковых данных. В частности алгоритм HANDS [17] основан на сравнении разновременных композитных изображений NOAA-AVHRR и критериях согласованности участков значимого снижения NDVI с, получаемыми с использованием тепловых спектральных каналов сенсора, температурными аномалиями в рассматриваемый период времени. Преимуществом данной методики является согласованный анализ двух сопутствующих воздействия огня на растительность независимых факторов. Вместе с тем разновременные данные подвержены влиянию различий фенологического состояния как повреждённой, так и здоровой растительности, что может оказывать негативное влияние на результаты детектирования поврежденных огнем участков в весенний и осенний периоды. Предложенная в работе [7] методика картографирования пожаров с использованием данных SPOT-Vegetation основана на использовании ежемесячных композитных изображений в отдельных спектральных каналах и вегетационных индексов, полученных путём осреднения исходных данных. Для рассматриваемого сезона учитывается набор различных критериев, компенсирующих влияние фенологической динамики растительности и позволяющих выявлять повреждения, опираясь на данные о спектральных характеристиках здоровой и поврежденной огнем растительности. Разработанный для Северной Евразии региональный алгоритм GBA2000 [6] также основан на оценке внутригодовых изменений отражения в каналах NIR и SWIR SPOT-Vegetation. Описанные подходы, основанные на анализе внутригодовых вариаций, несмотря на возможность применения с использованием данных, полученных в течение одного пожароопасного сезона, обладают рядом ограничений, так как не позволяют адекватно учсть влияние сезонных изменений растительности. Кроме того, в некоторых типах экосистем первичное восстановление растительности после пожара происходит достаточно быстро и при использовании наблюдений с десятидневной частотой его воздействие может не проявиться в заметном изменении спектральных характеристик, в том числе и потому, что наблюдение непосредственно после пожара зачастую затруднено остаточными дымами и облачностью. Остаётся также нерешённой проблема смешанного выявления участков поврежденных пожарами и растительности деградирующей в результате воздействия болезней, насекомых, засух и других факторов, которые могут вносить значительную погрешность в картографировании пройденных огнем площадей.

Рассмотрение преимуществ и ограничений ряда рассмотренных алгоритмов создало необходимые предпосылки для предложенного методологического подхода, основанного на выявлении межгодовых спектрально-временных различий данных спутниковых наблюдений, динамически учитывающего различия сезонной динамики растительности и включающего анализ температурных аномалий в качестве независимого источника информации о воздействии огня на экосистемы.

### **Алгоритм детектирования поврежденной пожарами растительности**

#### *Описание методических принципов положенных в основу алгоритма*

Разработанный алгоритм картографирования поврежденной огнем растительности по данным SPOT-Vegetation основан на использовании совокупности критериев, учитывающих как потенциальные изменения спектрально-отражательных свойств растительности под воздействием пожаров, так и компенсирующих вероятные ошибки распознавания вследствие межгодовых различий фенологической динамики экосистем и влияния ряда мешающих факторов. На основе исходных декадных данных, прошедших предварительную обработку формируются два временных ряда коротковолновых вегетационных индексов – за исследуемый год и предшествующий ему, при этом осуществляется коррекция разницы межгодового начала вегетации. Мониторинг повреждений опирается на межгодовые различия в поведении временных рядов индексов в беснежный период. Выявленные сильные различия проходят пространственную проверку на условие сильного отличия от окружающей их территории, а также пространственно-временное совмещение с данными тепловых аномалий MODIS. Логическая схема алгоритма, предполагающая реализацию ряда описанных ниже последовательных шагов, представлена на рисунке 2.

#### *Предварительная обработка спутниковых данных*

К числу ограничений затрудняющих непосредственное использование исходных продуктов спутниковых данных S10 для выявления пройденных огнем участков растительности относится наличие помех в

результате влияния облачности, теней от облаков, сезонного покрытия поверхности снежным покровом, а также аппаратурных дефектов в наибольшей степени проявляющихся в данных среднего ИК канала SPOT-Vegetation. Выполнение этапа предварительной обработки направлено на формирование для каждого композитного изображения S10 масок пикселей, соответствующих закрытой снегом поверхности, наличию облачности, дымов, а также пикселей зашумленных вследствие аппаратурных дефектов.

Для покрытой снегом и льдами территории характерны высокие значения коэффициента отражения в видимом канале, а также высокие значения нормализованного разностного индекса снега NDSI [18], описываемого следующим выражением:

$$NDSI = \frac{R_{red} - R_{swir}}{R_{red} + R_{swir}} \quad (2)$$

где  $R_{red}$  и  $R_{swir}$  - соответственно значения коэффициента отражения подстилающей поверхности, измеренные в красном и среднем ИК каналах SPOT-Vegetation.

Исходя из этого, для детектирования пикселей, зашумленных влиянием снежного покрова и льдов используются следующие пороговые критерии (3):

$$R_{red}(\Theta, t^*) \geq 0.1, \quad NDSI(\Theta, t^*) \geq 0.1 \quad (3)$$

Следующим шагом является маскирование пикселей, которые могут содержать облачность. Для них, в отличие от различных типов растительности, характерно высокое значение отражения в голубом канале. Высокие значения отражения также возможны на солёных и очень светлых почвах, что требует дополнительного критерия для их разделения. В задаче выявления повреждений растительности пожарами, возможно использование следующего порогового критерия (4):

$$R_{blu}(\Theta, t^*) \geq 0.1, \quad R_{NIR}(\Theta, t^*) - R_{SWIR}(\Theta, t^*) \geq 0 \quad (4)$$

В заключение производится фильтрация данных, зашумленных в результате дефектов сенсора, дымов, остаточной облачности или остаточного влияния снежного покрова. Для указанных пикселей характерны сильные отличия значений спектрального отражения  $R_{swir}$  от средних сезонных значений временных рядов. Отдельно рассматриваются зимний, весенний, летний и осенний сезоны. Критерием для отделения зашумленных пикселей является выход значения  $R_{swir}$  за интервал, границы которого определяются по удвоенному стандартному отклонению от среднего значения (5):

$$|R_{SWIR}(\Theta^*, t) - M_{SWIR}(\Theta^*, t)| \geq 2 \cdot \sigma_{SWIR}(\Theta^*, t) \quad (5)$$

В рассмотрение не берутся пиксели, отфильтрованные, как зашумлённые, в процессе фильтрации снежного покрова и облачности. Для более качественной фильтрации последняя операция повторяется дважды.

### *Вычисление и восстановление временных серий данных SWVI*

Полученные в результате предварительной обработки данные продуктов S10 используются для вычисления согласно выражению (1) значений индекса SWVI для каждой декады наблюдений за двухлетний период, включающий год, для которого проводится картографирование пройденных огнем площадей, а также год ему предшествующий.

Для зашумленных наблюдений, выявленных на этапе предварительной обработки спутниковых данных, производится восстановление значений индекса SWVI (рис. 3) методом линейной аппроксимации с использованием свободных от влияния мешающих факторов и ближайших во времени предшествующих и последующих наблюдений.

### *Вычисление подекадных межгодовых разностей SWVI*

Выявление аномальных изменений растительного покрова, вызываемых воздействием пожаров, требует учета естественной сезонной динамики растительности и осуществляется с использованием межгодовых подекадных разностей DWI, вычисляемых для каждого пикселя с координатами  $(i, j)$  по значениям индекса SWVI согласно выражению:

$$DWI^k(i, j, t, t^*) = SWVI^k(i, j, t) - SWVI^k(i, j, t^*), \quad (3)$$

где  $t$  - номер декады  $k$ -го года, а  $t^*$  - номер соответствующей декады  $k-1$  года. Для компенсации влияния межгодовых различий фенологической динамики на результаты детектирования повреждений в качестве  $t^*$  выбирается декада, соответствующая минимуму функции  $DWI^k(i, j, t, t^*) \forall t^* = (t-1, t, t+1)$ . Вычисление значений DWI производится для всех декад (рис. 4), в которые территория была свободна от снежного покрова в оба года наблюдений.

## **Пороговое детектирование предполагаемых участков повреждений**

Связанные с воздействием огня различия в состоянии растительности в текущем и предыдущем годах могут выражаться в существенных отклонениях значений DWI от нуля в область отрицательных значений. Для выявления пикселей, соответствующих предполагаемым гарям в качестве первого приближения используется следующий критерий

$$DWI^k(i, j, t, t^*) < P_1, \text{ ГДЕ } PI = 0.08. \quad (4)$$

### **Пространственная фильтрация участков изменения растительного покрова**

После использования описанной выше пороговой процедуры, результаты детектирования содержат наряду с поврежденными пожарами участками также и пиксели, относящиеся к территориям, на которых появление отрицательных аномалий DWI вызвано другими причинами, например разливами рек, различиями в условиях наблюдения и т.д. На данном шаге для каждого отдетектированного на предыдущем этапе пикселя формируется окно переменного размера, содержащее пять или более пикселей ближайшей окрестности, не включенных согласно критерия (4) в множество пикселей предполагаемых повреждений. Значения сглаженного индекса SWVI для указанных пикселей ближайшей окрестности в каждую декаду используются для оценки значения среднего  $M_{swvi}$  и стандартного отклонения  $\sigma_{swvi}$  окрестности. Пиксель считается принадлежащим к пройденным пожарами участкам, если соответствующее ему значение SWVI меньше чем ( $M_{swvi} - \sigma_{swvi}$ ).

### **Оценка согласованности участков изменений растительности с тепловыми аномалиями**

Для идентификации вызванных воздействием огня повреждений растительности, предусматривается оценка пространственно-временной согласованности выявляемых по данным SPOT-Vegetation изменений с информацией о действующих пожарах, получаемой по данным MODIS со спутников Terra и Aqua на основе алгоритма MOD14 v.4 [19]. На данном этапе все детектированные на предыдущих стадиях алгоритма пиксели подекадно группируются в связные области, которые территориально сопоставляются с тепловыми аномалиями по данным MODIS, зафиксированными в совпадающую по времени декаду, а также предшествующую ей. В качестве критерия пространственной согласованности принимается наличие одного процента площади связной области, совпадающей с тепловыми аномалиями. При этом считается, что каждая точка аномалии имеет характерные размеры в один километр. Окончательно выявленный участок изменения растительности считается поврежденным пожарами, если он согласуется в пространственном и временном отношении.

## **Заключение**

Разработанный метод открывает широкие возможности для организации регулярного мониторинга поврежденной огнем растительности бореальных экосистем на основе использования временных серий данных наблюдений спутниковым прибором SPOT-Vegetation. В результате использования метода могут быть получены как интегральные оценки пройденных огнем площадей, так и восстановлена динамика распространения пожаров (рис. 5), а также получены данные для определения продолжительности пожароопасных сезонов в различных экосистемах, как важной характеристики климатических изменений. Описанный алгоритм является составной частью автоматической технологии, обеспечивающей возможность получения оценок пройденных огнем площадей на регулярной основе, и создания банка данных долгосрочных наблюдений за воздействием пожаров на растительный покров бореальных экосистем. К настоящему времени метод верифицирован и продемонстрировал высокий уровень точности [20], что позволило его использовать для получения данных о пройденных огнем площадях на территории Северной Евразии за период 2000-2003 годов [21]. Кроме того, разработанная на основе метода автоматическая технология картографирования пройденных пожарами площадей включена в качестве составной части в методическое обеспечение системы дистанционного мониторинга лесных пожаров России [22].

## **Литература**

1. Kasischke E. S., French N. H. F., Harrell P., Christensen N. L., Ustin S. L., & Barry D., Monitoring of wildfires in Boreal Forests using large area AVHRR NDVI composite image data. *Remote Sensing of Environment*, (1993) 45, 61– 71.
2. Pereira J. M. C., A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (1999), 37(1), 217– 226.

3. *Boschetti L., Flasse A., A. Jacques de Dixmude and Trigg S.*, A multitemporal change-detection algorithm for the monitoring of burnt areas with SPOT-Vegetation data, in L. Bruzzone and P. Smits (eds.), Analysis of MultiTemporal Remote Sensing Images, World Scientific, Singapore (2002), 75-82.
4. *Fraser R. H., and Li Z.*, Estimating fire-related parameters in boreal forest using SPOT VEGETATION. *Remote Sensing of Environment*, (2002), 82, 95–110.
5. *Stroppiana D., Pinnock S., Pereira J. M. C. and Gregoire J.-M.*, Radiometric analysis of SPOT-VEGETATION images for burnt area detection in Northern Australia. *Remote Sensing of Environment*, (2002), 82, 21–37.
6. *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.* Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, (2004), VOL. 109
7. *Zhang Y.-H., Wooster M.J., Tutubalina O., Perry G.L.W.*, Monthly burned area and forest fire carbon emission estimates for the Russian Federation from SPOT VGT, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 87, Issue 1, pp. 1–15
8. Roy D.P., Lewis P.E., Justice C.O., 2002, Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data - a bi-directional reflectance model-based expectation approach. *Remote Sensing of Environment*, 83:263-286.
9. *Simon, M.* (2002). *GLOBSCAR Products Qualification Report*. ESA-ESRIN, Frascati, Italy.
10. *Garcia M. J., and Caselles V.*, Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data. *Geocarto International*, (1991), 1, 31–37.
11. VEGETATION User Guide: *VEGETATION User Guide*: <http://www.spot-vegetation.com>
12. The VEGETATION Catalog at VITO: <http://www.vgt.vito.be/catalogue/catalogue.html>
13. Архив данных SPOT-Vegetation, портал VITO <http://free.vgt.vito.be>
14. Rouse, J.W., R.H.Haas, J.A.Schell, and D.W.Deering, 1973: Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I: 309-317.
15. *Gao B.C.*, NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, (1996), 58, 257–266.
16. *Kaufman Y. J., and Remer L. A.*, Detection of forests using mid-IR reflectance: an application for aerosol studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (1994), 32, 672–683.
17. *Fraser, R. H., Li, Z., & Cihlar, J.* Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): A new technique for burned area mapping over boreal forest. *Remote Sensing of Environment*, (2000), 74, 362–376
18. *Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V.* Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // *Remote Sensing of Environment*, 1995, №54, Р.127-140.
19. *Justice, C. O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J. T., Roy, D., Descloitres, J., Alleaume, S., Petitcolin, F., and Kaufman, Y.*, The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83:244-262.
20. Барталев С.А., Беляев А.И., Егоров В.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Кориунов 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)
21. Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Уваров И.А. Оценка площадей повреждений наземных экосистем Северной Евразии пожарами в 2000–2003 годах по спутниковым данным инструмента SPOT-Vegetation // Сборник научных статей Второй открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Институт космических исследований РАН, Москва, 16-18 ноября 2004г. (настоящий сборник)
22. 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)

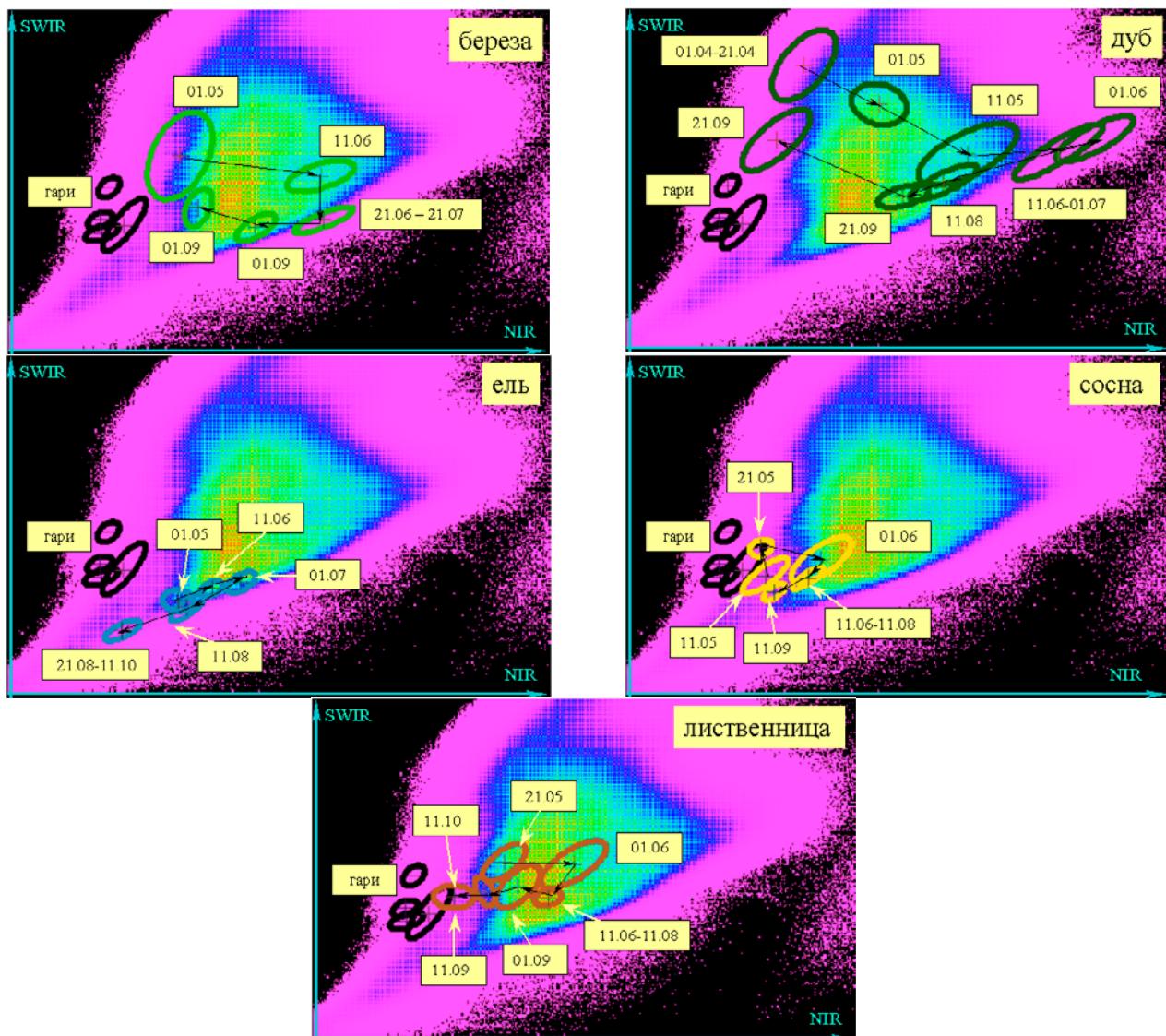
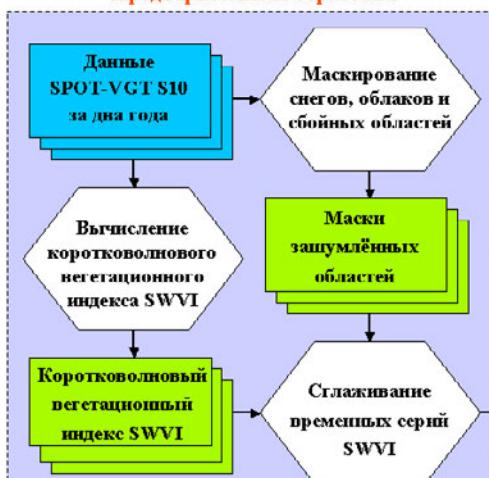


Рис. 1. Сезонная динамика спектральных сигналов некоторых типов лесов в различных фазах фенологического состояния и различной степени повреждения пожарами

#### Предварительная обработка



#### Тематическая обработка



#### Сравнение с данными MODIS и создание продуктов

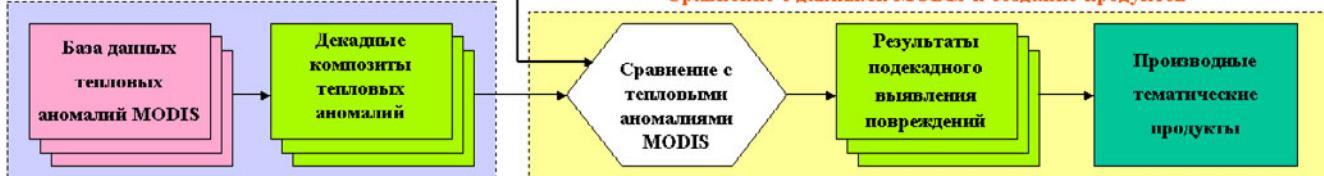


Рис. 2. Логическая схема алгоритма картографирования поврежденной пожарами растительности по данным SPOT-Vegetation и Terra/Aqua-MODIS

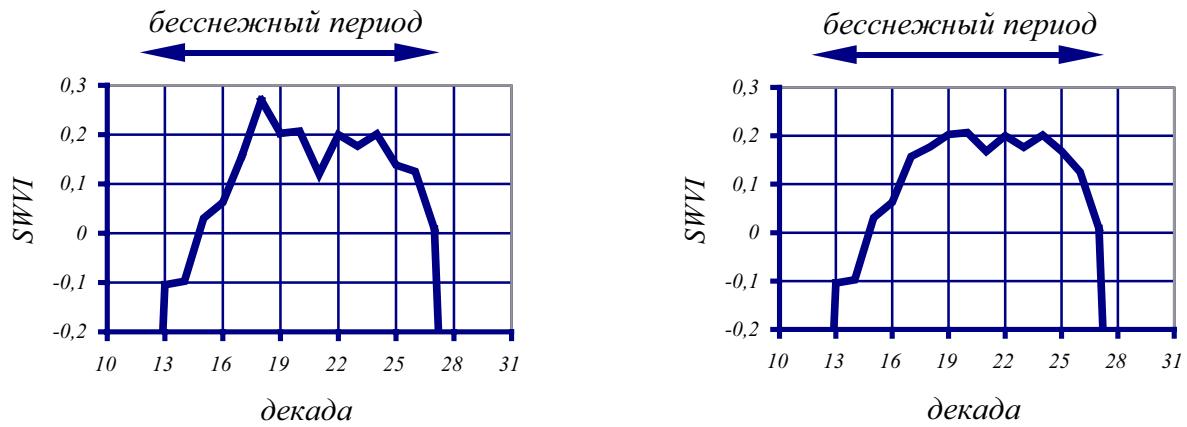


Рис. 3. Временной ряд индекса SWVI до и после процедуры сглаживания

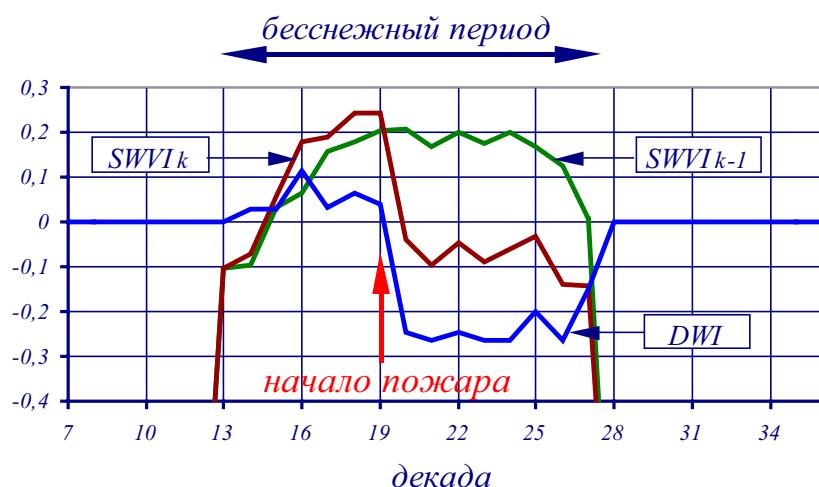


Рис. 4. Временная динамика разностного индекса DWI для участка растительности повреждённого огнём

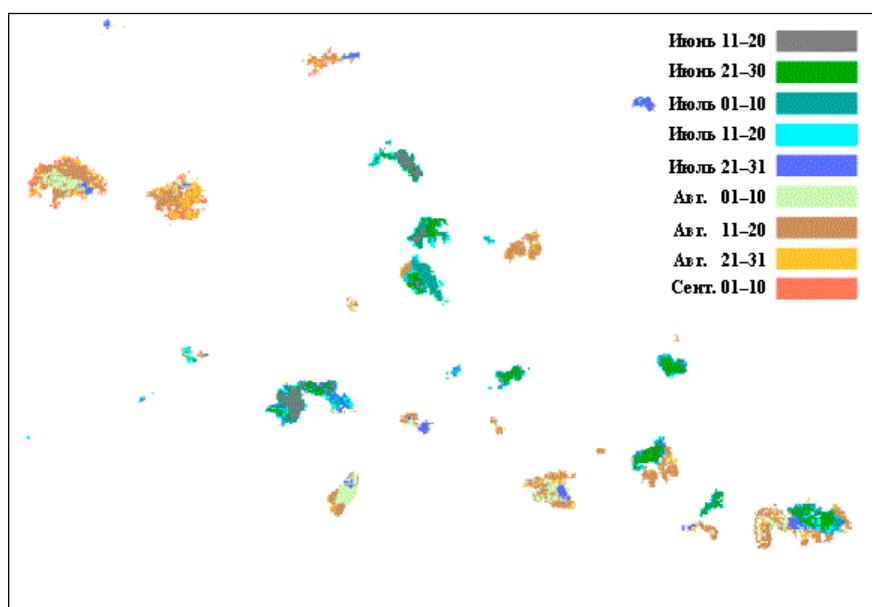


Рис. 5. Оценка временной динамики повреждения растительности огнём по данным SPOT-Vegetation