

УДК 535.853.623

Б. И. Беляев, зав. лабораторией НИИ ПФП БГУ; Л. В. Катковский, вед. науч. сотрудник НИИ ПФП БГУ; В. А. Сосенко, зав. лабораторией НИИ ПФП БГУ; Ю. В. Беляев, науч. сотрудник НИИ ПФП БГУ; Т. М. Курикина, науч. сотрудник НИИ ПФП БГУ; А. А. Казак, мл. науч. сотрудник НИИ ПФП БГУ; И. А. Тяшкевич, директор УП «Космоаэрогеология»

### **ПРИМЕНЕНИЕ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ АВИАЦИОННЫХ СЪЕМОК ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ**

General provisions of a remote method development for an estimation of fire-pasted conditions of Belarusian forests are stated. The engineering of preliminary processing of the images received from aviation complex ВСК-2, constructions of mosaics and receptions of a thematic map, and also a technique of an express-estimation of damage from forest fires is described.

#### **Современные возможности дистанционных методов и объекты работ**

С увеличением пространственного разрешения многоспектральных авиакосмических систем в дистанционном зондировании лесов появилась возможность перехода от традиционной попиксельной классификации и сегментации к работе на изображениях с основным структурным элементом лесонасаждений – отдельной кроной дерева [1]. Такую операцию позволяют проводить и изображения, получаемые разработанным в НИИ ПФП Белгосуниверситета видеоспектральным комплексом ВСК-2 для оперативного мониторинга лесов (разрешение 30–100 см/пиксель) [2]. Спектры и изображения, получаемые ВСК-2, дают хорошие возможности для полуавтоматической инвентаризации лесов.

Важной задачей мониторинга лесов является картирование пройденных огнем участков леса, которое не уступает по своей значимости детектированию действующих пожаров [3, 4]. Ее решение позволяет подойти к возможности оценки площадей гарей, а также ущерба, причиненного огнем, с использованием авиационных съемок высокого пространственного разрешения. Дистанционные методы позволяют регистрировать и оценивать динамику и последствия пожаров с любой степенью детализации и точности, а также с высокой оперативностью и относительно небольшими затратами, что дает возможность резко сократить объем наземных полевых работ по оценке послепожарного состояния лесов. Данные о количестве участков и размерах площадей гарей и горельников, полученные по видеоинформации с борта авианосителя, более достоверны, чем данные, полученные с мест (из-за неполноты информации в последнем случае) или с использованием космических снимков (из-за невысокой периодичности получения качественных снимков, закрытости облаками, недостаточного пространственного разрешения, невозможности выявления площадей, пройденных слабыми низовыми пожарами).

Для определения площадей пожарищ и слежения за послепожарной динамикой лучше всего подходят спектральные каналы 0,55–0,60; 0,64–0,69 и 0,76–0,86 мкм. Наиболее сильный контраст наблюдается в ближнем ИК-диапазоне спектра.

В простейшем случае обнаружение очагов пожарищ может проводиться оператором визуально. Однако такая обработка требует больших затрат времени и не обеспечивает высокой точности. Более адекватным является применение методов компьютерной классификации на базе спектральных обучающих выборок, а также методов линейного спектрального разделения, адаптивной фильтрации, спектрального фитирования

способом наименьших квадратов и т. п. При этом возможно установление различных состояний объекта, например градаций процента выгорания леса либо зарастания гари травой и т. п.

Метод линейного спектрального разделения является средством определения относительного содержания компонента (в данном случае доли подстилающей поверхности с определенными свойствами) на основе многоспектрального изображения при использовании характеристических спектров компонента. Метод адаптивной фильтрации обеспечивает быстрое обнаружение и определение содержания конкретного заданного компонента (лесной гари) и не требует знания спектров всех остальных компонентов в изображении сцены.

Общепризнанным стало то, что достаточно точный процесс классификации на данном этапе не может быть полностью автоматическим, обязательным является привлечение экспертных знаний, т. е. визуальная оценка – это все еще надежная основа классификации изображений с высоким разрешением.

Съемки различных тестовых полигонов с использованием комплекса ВСК-2 с борта вертолета Ми-2 ГП «Беллесавиа» при различных режимах полетов и измерений проводились 18–19 июня 2002 г. Получены обзорные ТВ-изображения, спектрзональные изображения и географически привязанные спектры растительности, связанные с записанными спектрзональными изображениями (рис. 1).

Съемки лесных территорий, пройденных огнем, позволили отработать методику решения задачи выделения и картирования зон лесного пожара, предложить методику расчета ущерба, причиненного пожарами. Для разработки методов мониторинга в качестве участков, пораженных лесными пожарами, выбраны Налибокское лесничество Новогрудского лесхоза и Негорельский учебно-опытный лесхоз, в пределах которых обнаружены участки с горями.

#### **Предварительная обработка данных съемок полигонов комплексом ВСК-2**

Спектрзональные изображения были получены с использованием в основном трех спектральных фильтров с центрами полос пропускания 560, 820, 655 нм. Выбранные полосы для получения спектрзональных изображений, как правило, используются в дистанционном зондировании для выделения растительности на фоне других подстилающих поверхностей. Предварительная обработка изображений включала их оцифровку, отбор, систематизацию и каталогизацию. Как правило, в процессе съемок велась одновременно запись изображений с обзорной ТВ-камеры и спектрзональных изображений. Для использования в дальнейшем при тематической обработке обзорных ТВ-изображений последние переводились из аналоговой формы (запись на видеомagneфон) в цифровую. Полученные обзорные ТВ-изображения используются, во-первых, как вспомогательные для облегчения процесса привязки спектрзональных изображений друг к другу, к карте и сетке (границам) кварталов и выделов лесничеств, имеющих в ГИС «Лесные ресурсы». Эта функция обеспечивается благодаря более широкому угловому полю зрения обзорной ТВ-камеры, несколько лучшему пространственному разрешению, а также тому, что обзорные изображения записываются в естественных цветах (стандартные ТВ-каналы) и легко распознаются глазом. Во-вторых, ТВ-изображения также используются при тематической обработке и классификации лесных объектов.

### Построение мозаики изображений

В результате нестабильности курса и направления надирной оси жестко связанного с вертолетом прибора, случайных крена, тангажа и рысканий, влияния ветра получается криволинейная траектория полета. Имеет место также изменение скорости при различных направлениях полета. Вышеизложенные причины приводят к необходимости задания достаточно большого перекрытия последовательных кадров и трасс полета и затрудняют построение площадных мозаик изображений. Полученные мозаики не покрывают всей площади, могут иметь место как внутритрассовые, так и, в особенности, межтрассовые пропуски. Эта особенность присуща вертолетным съемкам. Заметим, что наличие достаточно точной геопривязки (GPS-системы) не решает проблему из-за колебания оси прибора в результате неучитываемых движений вертолета, указанных выше.

Перечисленные причины несколько искажают исходные изображения, что затрудняет построение мозаик. Эти проблемы могут быть решены на базе использования гиросtabilизированных платформ.

При обработке изображений на данном этапе фотометрическая коррекция не проводилась, а использовались методы классификации, слабочувствительные к освещенности.

Результатом предварительной обработки изображений являются площадные мозаики изображений участков леса, привязанные к соответствующим картам ГИС. Мозаичные изображения перекрывающихся кадров и трасс полетов строились интерактивно с использованием программных пакетов «MS Corel Draw», «Corel Photo Paint», «PhotoShop», ENVI. Для неперекрывающихся (или перекрывающихся в отдельных кадрах) трасс вначале проводилась «привязка» каждой трассы к сетке границ выделов ГИС «Лесные ресурсы», а затем строилась площадная мозаика из отдельных изображений трасс, которые являются уже «геопривязанными» (относительно, в пределах одного лесничества). Окончательное мозаичное изображение с наложенной сеткой границ кварталов и выделов сохраняется на диске в графическом формате *.jpeg* и готово для тематической обработки.

Недостатки такой методики предварительной обработки: границы выделов и кварталов, изображаемые заданным цветом, являются элементами изображения и подлежат классификации, как и все другие пиксели; формат *.jpeg* является достаточно экономным, поэтому выгоден для сохранения файлов очень большого объема (каковыми являются площадные мозаики), однако при этом применяется сжатие данных, приводящее к потере (искажению) как пространственной, так и цветовой информации. Последний недостаток может быть преодолен использованием более быстродействующего компьютера с большой оперативной памятью.

### Тематическая обработка данных

Тематическая обработка данных авиационных съемок состоит в сегментации (выделении однородных по своим свойствам) объектов изображения (групп пикселей) и отнесении их к тому или иному заранее определенному классу.

Исходными (подлежащими классификации) данными являются:

- площадные геопривязанные мозаики изображений или отдельные изображения, полученные на базе обзорной ТВ-камеры комплекса ВСК-2;
- площадные мозаики спектрзональных изображений, полученные на базе блока спектрзональной съемки комплекса ВСК-2.

Для тематической классификации используются следующие данные, на основе которых задаются искомые классы лесной растительности и формируются эталонные данные для этих классов (обучающие выборки):

- спектры высокого разрешения, получаемые с борта вертолета спектрометром МС-09, входящим в состав ВСК-2;
- таксационные параметры выделов, содержащиеся в базе данных ГИС «Лесные ресурсы»;
- таксационные данные текущих обследований лесных территорий (данные, получаемые БГТУ, НИПП «Космоаэрология», ГП «Беллесозащита»).

Необходимо отметить, что ТВ-изображения также могут быть использованы для визуальной тематической классификации лесных территорий. Так, на ТВ-изображениях, получаемых обзорной ТВ-камерой, участки леса хвойных пород изображаются темно-зелеными (почти черными) тонами, участки лиственных пород – светло-зелеными, поляны и подлесок – еще более светло-зелеными и зелено-желтыми, кроны сухих елей изображаются светло-желтыми, почти белыми и малиновыми, гари – темно синими, сиреневыми и черными тонами.

Для тематической классификации с обучением используются следующие методы-классификаторы: параллелепипеда; минимального расстояния; максимального правдоподобия; расстояния Махаланобиса; спектрального угла. Различные методы дают в разных случаях слегка отличающиеся результаты, поэтому осуществляется сравнительный отбор метода на основе оценки качества классификации.

#### **Методика и результаты экспресс-оценки ущерба от лесных пожаров с использованием данных авиационной съемки комплексом ВСК-2**

Методика предназначена для картирования пройденных огнем участков леса (гарей) и для получения экспресс-оценки ущерба от потери древостоя в результате лесных пожаров.

Выходными данными являются: тематическая карта с нанесенными гарями и горельниками и объем сгоревшей древесины.

Для реализации методики необходимо решить следующие задачи:

- идентифицировать лесные гари на полученных видео- и спектральнональных изображениях;
- определить местоположение лесных гарей (координатная привязка либо к электронной карте, если она имеется, либо к границам в ГИС «Лесные ресурсы»);
- сформировать маски гарей и определить площади сгоревшего леса;
- оценить ущерб от потери древостоя в натуральных показателях.

После привязки изображений к ГИС (или электронной карте) и согласования масштабов (определение абсолютных размеров пикселя) площади лесных гарей вычисляются автоматически. Заметим, что похожая методика используется МЧС России для космических снимков.

Исходными данными для расчетов являются: изображения и спектры, полученные видеоспектральным комплексом ВСК-2 с разрешением не хуже 1 м (высоты полетов 500–1500 м), которые позволяют выявить положения и площади гарей (радиометрическое разрешение должно быть не хуже 8 бит (в ВСК-2: разрешение видеоканалов – 8 бит, спектрометра – 12 бит), оптимальный набор спектральных каналов – 3 (или более), лежащих в следующих диапазонах: 0,5–0,6; 0,6–0,7; 0,8–1,1 мкм (в ВСК-2 использовались: 0,56; 0,655; 0,82 мкм)); информация, содержащая данные о породном составе, вы-

соте, толщине и запасе сгоревшей лесной растительности (указанная информация имеется в ГИС «Лесные ресурсы»).

Алгоритм методики включает следующие основные этапы.

1. Определение местоположения лесных гарей по видео- и спектральному изображениям, отбор необходимых кадров и трасс, радиометрическая и геометрическая коррекция кадров (если необходима).

2. Построение мозаики изображений по участкам местности, на которых предположительно имеются гари от лесных пожаров с использованием программ «MS PhotoDraw», «Corel PhotoPaint», ENVI.

3. Привязка мозаики изображений к сетке границ выделов и кварталов соответствующего лесничества.

4. Импорт изображений в программу ENVI с преобразованием в соответствующий формат.

5. Распознавание лесных гарей методом классификации без обучения ISODATA (кластерный анализ всего большого изображения).

6. Идентификация полученных в предыдущем пункте классов по методу анализа их спектральных кривых с привлечением спектров высокого разрешения, полученных спектрометром комплекса.

7. Формирование обучающих областей по идентифицированным классам и проведение дополнительной классификации с обучением.

8. Окончательный анализ классов, создание «маски» из классов, соответствующих гарям и горельникам.

9. Наложение маски «гарей» на исходное изображение (раскраска карты) – получение тематической карты гарей.

10. Подсчет площадей, пройденных пожаром.

11. Определение характеристик выгоревших участков леса.

12. Определение объема сгоревшей древесины.

Анализ сопутствующих спектров позволяет отбраковать ненужные классы объектов, полученные на первом этапе классификации (без обучения), и выбрать наиболее надежно установленные небольшие участки гарей в качестве обучающих выборок для последующей классификации с обучением. Результат окончательной идентификации и создания маски гарей по Налибокскому лесничеству показан на рис. 2, где самым темным тоном отображены площади полностью сгоревшего леса (заметим, что прилегающие к ним участки более светлых тонов соответствуют частичному выгоранию деревьев). На рис. 3 слева приведено мозаичное изображение территории Негорельского учебно-опытного лесхоза, на которой обнаружен относительно небольшой по площади участок гари (обведен эллипсом). На этом же рисунке справа приведен отдельный кадр, содержащий участок с гарью и наложенной на нее после соответствующей обработки и классификации контуром маски гари.

Для вычисления площади сгоревшего леса в программу необходимо ввести абсолютный размер, соответствующий пикселю ( $x$ ,  $y$ ) изображения на местности. Размер пикселя изображения, соответствующий исходному кадру, может быть легко вычислен, если известны высота съемки (полета) и параметры оптической системы аппаратуры. Однако в процессе предварительной обработки и создания мозаики изображений осуществляется ряд преобразований (например, кадрирование, деформация с целью привязки к квартальной сети или карте и т. п.), что влечет за собой изменение размеров пикселей и их количества путем пространственной пере выборки. При этом разрешение

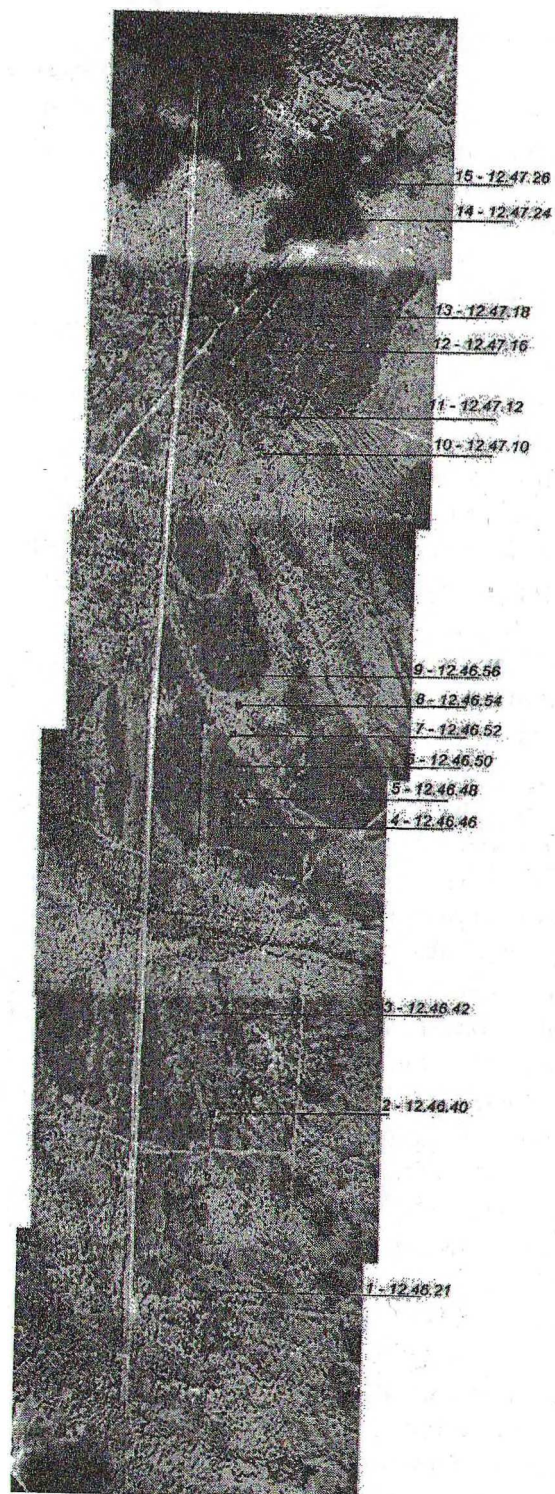
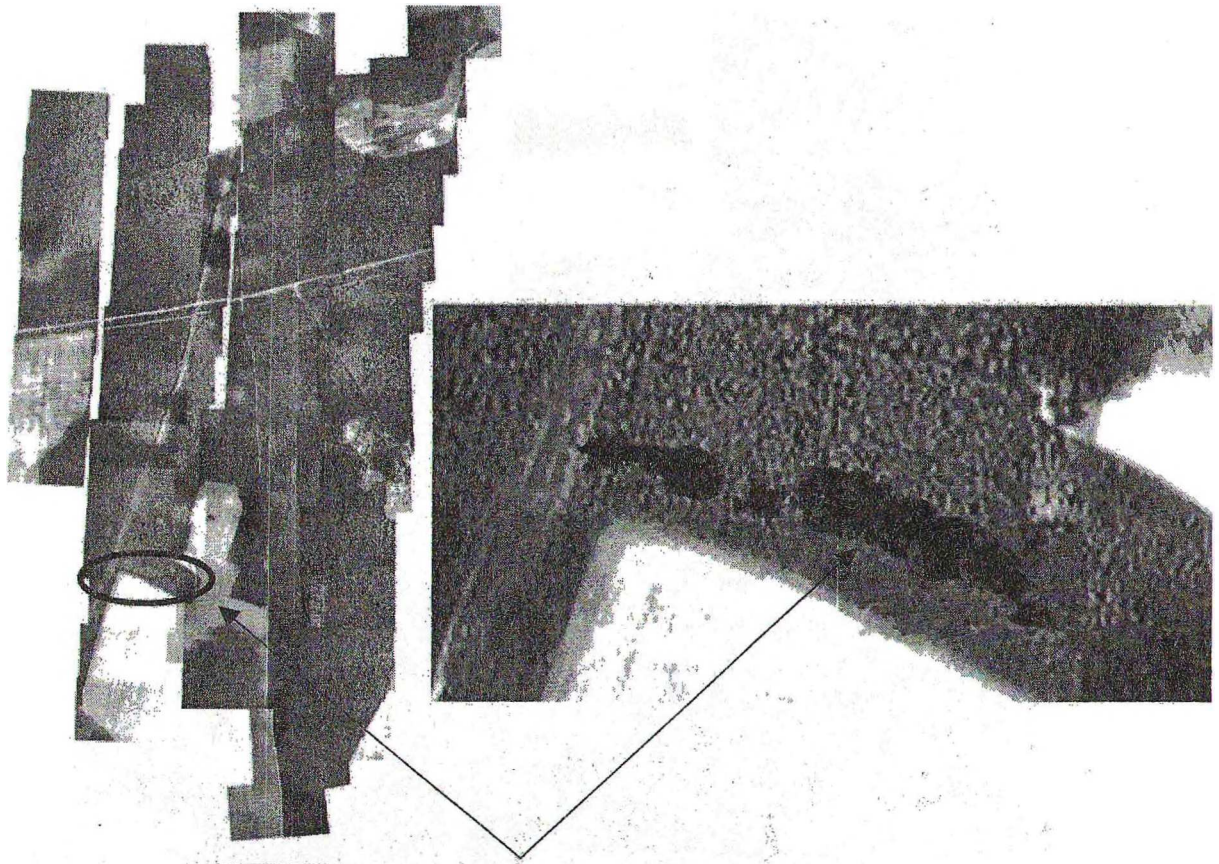


Рис. 1. Мозаичное изображение трассы с указанием спектрометрируемых площадок

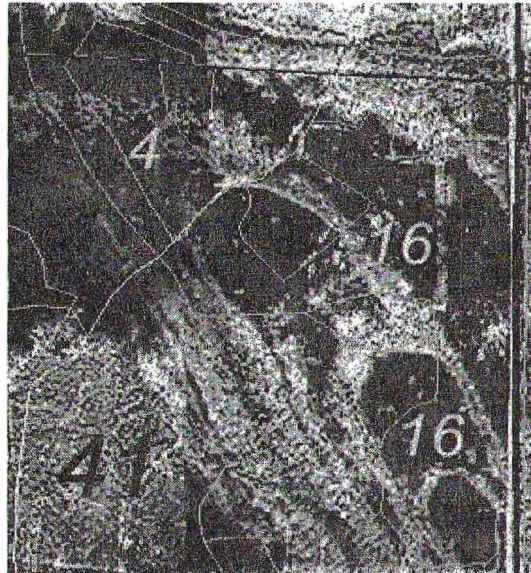


Рис. 2. Новогрудский лесхоз, Налибокское лесничество, тематическая карта «Последствия пожара»



– участки полностью выгоревшего леса (площадь 1,18 га)

Рис. 3. Негорельский учебно-опытный лесхоз, участок гари



– участки полностью выгоревшего леса

Рис. 4. Фрагмент Налибокского лесничества Новогрудского лесхоза



мозаичного изображения ухудшается (однако любой фрагмент его может быть взят с исходным высоким разрешением), а размер пикселя изменяется неконтролируемым образом. Для определения размеров пикселя в мозаичном изображении используется ГИС «Лесные ресурсы», в которой имеется функция вычисления расстояния между узлами векторного слоя. Площадь полностью выгоревшего леса в Налибокском лесничестве на рис. 2 оказалась равной  $\approx 84,76$  га, а площадь гари в Негорельском лесхозе на рис. 3 – 1,18 га.

В базе данных ГИС «Лесные ресурсы» имеются лесотаксационные характеристики, на основании которых можно провести расчет объема сгоревшей древесины. Путем использования вычисленной площади гари и характеристик лесного покрова на этом участке до пожара определяется объем сгоревшей древесины.

Для примера техники таких подсчетов на рис. 4 приведен фрагмент изображения Налибокского лесничества, а именно: выделы 4 (площадь 3,4 га) и 16 (площадь 18,9 га) квартала 41, в которых лес практически полностью выгорел. На каждом из этих участков запас сырораствующего леса был  $70 \text{ м}^3/\text{га}$  (сосна, 10С+Б). Таким образом, потери древесины на этих двух выделах составили  $V_{4+16} = 70 \text{ м}^3/\text{га} \times (3,4+18,9) \text{ га} = 1561 \text{ м}^3$ . Если предположить, что примерно такой же запас сырораствующего леса был в среднем на всем пожарище, то потерю древесины по всей выгоревшей территории найдем как произведение:  $70 \text{ м}^3/\text{га} \times 85 \text{ га} = 5950 \text{ м}^3$ .

Предложенный алгоритм совместно с регламентом использования комплекса ВСК-2 и методиками обработки спектральной и видеоинформации составляет основу предложенной методики оценки последствий лесных пожаров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. St-Onge B. Topographic effects on the texture of high-resolution forest-stand images measured by the semivariogram // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 1999. – V. 65. – No. 8. – P. 923–935.
2. Беляев Б. И., Беляев Ю. В., Веллер В. В., Залетный В. М., Казак А. А., Катковский Л. В., Курикина Т. М., Нестерович Э. И., Сосенко В. А. Авиационный аппаратно-программный комплекс ВСК-2 для контроля состояния лесов / Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: Доклады III Всерос. конф., посвящ. памяти Г. Г. Самойловича (Москва, 18–19 апреля 2002 г.). – М.: ЦЭПЛ РАН, 2002. – С. 115–118.
3. Ромасько В. Ю., Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Послепожарная инвентаризация лесных территорий по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. – 1998. – № 6. – С. 99–103.
4. Абушенко Н. А., Алтынцев Д. А. Оценка площадей крупных лесных пожаров по данным AVHRR/NOAA // Исследование Земли из космоса. – 2000. – № 2. – С. 87–93.