

**А. Маркс (A. Marx; RapidEye, Германия)**

Окончил Университет прикладных наук в Эберсвальде (Германия), Университет Южного Креста (Новый Южный Уэльс, Австралия), Варшавский сельскохозяйственный университет (Польша). Магистр по специальности «информационные технологии в лесном хозяйстве». С 2007 г. работает в компании RapidEye в департаменте развития в качестве эксперта по технологиям мониторинга лесов.

## Мониторинг лесов с помощью группировки спутников RapidEye\*

### ОПЕРАТИВНЫЙ МОНИТОРИНГ ЛЕСОВ ГРУППИРОВКОЙ СПУТНИКОВ RAPIDEYE

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) и мониторинг состояния окружающей среды с помощью спутников с оптической бортовой аппаратурой стали возможными благодаря нескольким десятилетиям технического совершенствования сенсоров и спутниковых платформ. В 1972 г. США вывели на орбиту спутник природно-ресурсного назначения Landsat со съемочной аппаратурой, обеспечивавшей получение мультиспектральных снимков. Примерно в это же время в СССР началась разработка, а позднее и эксплуатация спутников серии «Ресурс-Ф», снабженных камерами, изготовленными компанией Carl Zeiss Jena (ГДР), предназначенными для проведения мультиспектрального фотографирования поверхности Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне с высокими геометрическими и фотометрическими характеристиками. Группировка спутников RapidEye была запущена на орбиту российской ракетой «Днепр-1» 29 августа 2008 г. Группировка состоит из 5 одинаковых микро-спутников, на каждом из которых установлена мультиспектральная камера высокого разрешения JSS56 (Jena Space Borne Scanner 56), изготовленная компа-

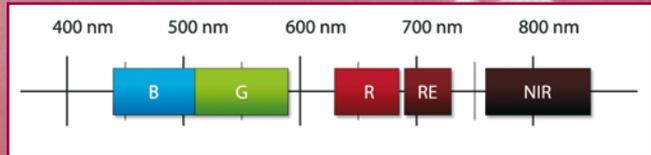
нией Jena Optronic GmbH (быв. Carl Zeiss Jena). Группировка RapidEye позволяет осуществлять мониторинг состояния окружающей среды, в частности состояния лесов из космоса (что прежде было невозможно). Это достигается благодаря трем уникальным характеристикам группировки:

- высокая повторяемость съемки, благодаря которой возможно многократное получение данных на интересующую территорию на протяжении всего вегетационного периода;
- большая площадь покрытий при высоком пространственном разрешении;
- 5-канальная мультиспектральная съемка, включая канал «крайний красный» (Red Edge)

Эта уникальная группировка спутников ДЗЗ позволяет сравнивать состояние больших площадей леса в различные периоды времени, используя снимки высокого разрешения. Кроме того, благодаря высокой повторяемости съемок повысилась возможность получения безоблачных и малооблачных снимков. Наличие 5 спутников позволяет оперативно реагировать на стихийные бедствия, включая крупные лесные пожары, обеспечивая заказчиков самой свежей информацией о причиненном ущербе. Временной анализ гарантирует оперативное получение данных о появлении насекомых-вредителей леса, та-

\* Перевод с английского языка. Перевод подготовлен к публикации Б.А. Дворкиным (Компания «Совзонд»)

Рис. 1.  
Спектральные каналы сенсора RapidEye



ких, как шелкопряд-монашенка (*Lymantria monacha*), непарный шелкопряд (*Lymantria dispar*), короед-типограф (*Ips typographus*). Аналогичным образом высокая повторяемость съемок со спутников RapidEye позволяет проводить и другие наблюдения, например контроль незаконных рубок леса или мониторинг деградации лесов. Проблема незаконных рубок леса особенно остро стоит в России, но нельзя сказать, что в других странах эта проблема решена. Причины этого явления могут быть различны, но его последствия для экологии и экономики всегда неблагоприятны. Используя возможности своей группировки, компания RapidEye разработала целый комплекс сервисов, связанных с мониторингом лесов, позволяющих не просто накапливать данные, но производить готовые к использованию геоинформационные продукты. В табл. 1 представлены главные сервисы RapidEye для лесного хозяйства.

Отдельные примеры использования этих сервисов подробно рассмотрены в конкретных практических примерах использования, представленных в настоящей работе.

### СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАННЫХ RAPIDEYE И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ

Чтобы применять космические снимки для решения задач лесного хозяйства, исследователь должен знать базовые основы ДЗЗ, а также принципы работы съемочной аппаратуры.

Технические характеристики сенсора RapidEye:

- Спектральные каналы:
  - синий (Blue; B) – 440-510 нм
  - зеленый (Green; G) – 520-590 нм
  - красный (Red; R) – 630-690 нм
  - крайний красный (Red Edge; RE) – 690-730 нм
  - Ближний ИК (Near IR; NIR) – 760-850 нм
- Пространственное разрешение: 5 м
- Ширина полосы съемки: 75 км
- Радиометрическое разрешение: 12 бит

На рис. 1 приведена шкала электромагнитного спектра с расположением на ней спектральных каналов RapidEye.

Таблица 1

Сервисы RapidEye для лесного хозяйства

Инвентаризация лесных ресурсов	Мониторинг состояния леса	Мониторинг антропогенного воздействия и поддержка международных программ по защите леса	Охрана природы
Картографирование лесных угодий	Картографирование ущерба, причиненного ураганскими ветрами	Мониторинг лесозаготовок и незаконных рубок леса	Картографирование фрагментации лесов
Картографирование породного состава лесов	Картографирование ущерба от лесных пожаров	Поддержка международной программы защиты от деградации лесов REDD (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation)	Картографирование лесополос
Оценка запаса древесины	Картографирование ущерба от насекомых-вредителей		Мониторинг охраняемых лесов

Синяя зона спектрального излучения активно поглощается хлорофиллом (в основном хлорофиллом b). Эта зона очень чувствительна к атмосферным условиям, таким, как туман или дымка. По сравнению с красным или красным каналом синий – менее чувствителен к изменениям в содержании хлорофилла и, как следствие, используется только в специальных целях, таких, как, например, мониторинг вод. Для решения задач лесного хозяйства лучше всего использовать композиты зеленого и красного каналов для получения высококачественных цветных изображений, служащих в качестве основы в геоинформационных системах. Синий канал облегчает распознавание лесных пожаров на безоблачных снимках.

Здоровая растительность поглощает больше излучения в синей и красной зоне, отражая при этом значительную часть зеленого цвета. Зеленый канал служит не только для формирования композитного RGB-изображения, но и позволяет классифицировать растительность при использовании в сочетании с другими спектральными каналами. Он также незаменим при оценке общего состояния леса.

Красный канал очень важен для анализа состояния растительности (главным образом лесов) и очень активно используется. Поглощение света хлорофиллом а фотосинтезирующих растений имеет пик в красной части видимого электромагнитного спектра. Длина волны красного канала больше, чем синего, по этой причине состояние атмосферы влияет на него значительно меньше. Красный канал играет решающую роль при проведении анализа изменения лесного покрова, например при картографировании ущерба от стихийных бедствий, классификации видов растительности, мониторинге состояния лесного покрова, оценке запаса древостоя, жизнеспособности леса, определении местонахождения дорог и просек.

Наличие крайнего красного канала – уникальная особенность съемочной аппаратуры спутников RapidEye. Он используется в сочетании с ближним инфракрасным каналом для расчета индекса NDVIRE [(NIR-RE)/(NIR+RE)]. Этот индекс весьма чувствителен к изменениям содержания растительного хлорофилла [1]. До недавнего времени NDVIRE использовался главным образом для оценки N-статуса сельскохозяйственных посевов. Недавние исследования показали, что при помощи индекса NDVIRE можно точно определить сни-

жение содержания хлорофилла в листе лесного полога на самых ранних стадиях, например при нашествиях лубоеда-стригуна, вызывающих преждевременное старение, а нередко и гибель деревьев.

Здоровая растительность в значительной степени отражает инфракрасное излучение, невидимое человеческому глазу. Отражение происходит за счет большой площади поверхности листьев. Если лес страдает от нашествия насекомых, вредящих листе, снижение излучения в этой зоне спектра показывает потерю листы.

Отражающая способность листы деревьев сильно различается у разных видов. Отражающая способность листы хвойных пород гораздо ниже, чем лиственных. Значения NIR молодого хвойного древостоя выше, чем старого. Поэтому канал NIR является очень важным для классификации лесов, определения породного состава, а также для мониторинга заражения лесов насекомыми-вредителями.

Канал NIR также играет ключевую роль при картографировании последствий ураганного ветра, а в настоящее время становится важной составляющей при расчете некоторых показателей, определяющих биофизические параметры растительности.

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ RAPIDEYE ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ: ПРимеры ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Повторные, регулярные или нерегулярные съемки позволяют получать комплекс разнообразных продуктов и обеспечивать различные сервисы. Можно привести следующие примеры: инвентаризация лесных угодий, мониторинг изменений, представляющих интерес, мониторинг общего состояния лесного покрова для государственных нужд или для частных компаний, контроль незаконных рубок. Кроме того, можно осуществлять контроль состояния окружающей среды в национальных парках и заповедниках, вести наблюдения в рамках международных программ по защите лесов, таких, как REDD (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation), и оперативно собирать информацию о последствиях природных или антропогенных (бури, лесные пожары) катаклизмов. Широкий спектр адаптационных возможностей позволяет подобрать специфический набор функций наблюдения для той или иной задачи. Мониторинг измене-

ний производится на основе повторных или многократных съемок.

Ниже мы приведем конкретные примеры использования решений RapidEye для мониторинга лесов. Все представленные решения в настоящее время находятся в рабочем состоянии.

### Мониторинг состояния лесов (Компания «Немлес»; Республика Коми, Россия)

На рис. 2–3 представлен снимок лесного массива в Республике Коми, сделанный RapidEye. На рис. 2а (естественная цветопередача, без увеличения) видны зеленая растительность (лес), дороги и просеки



Рис. 2.

Снимки RapidEye (естественные цвета)

а. 26 июля 2010 г.

б. 14 августа 2010 г.

в. Выделенный сектор со сторонами 420 м

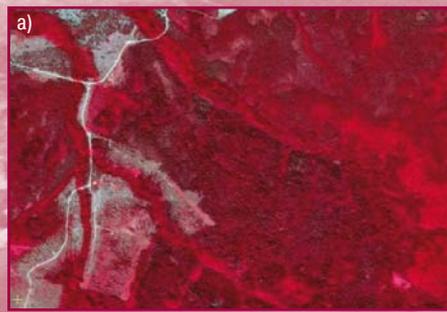


Рис. 3.

Снимки RapidEye (инфракрасный канал)

а. 26 июля 2010 г.

б. 14 августа 2010 г.

в. Выделенный сектор со сторонами 420 м

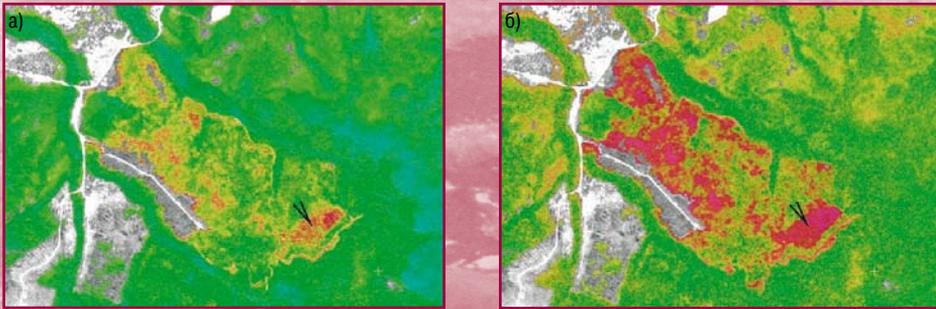


Рис. 4.

Снимок RapidEye, 14 августа 2010 г.

а. NDVIRE (лес). Видны тонкие различия степеней повреждения растительности; интерпретация цветовой гаммы: зеленый – здоровая, переходы от желтого к красному – снижение жизнеспособности

б. NRGDVI (лес). Можно разграничить сильно пораженную растительность и жизнеспособную; интерпретация цветовой гаммы: зеленый – здоровая, переходы от желтого к красному – снижение жизнеспособности

(1-я дата: 26 июля 2010 г.). Спустя 19 дней в том же лесном массиве заметно снижение жизнеспособности леса (рис. 2б, 2-я дата: 14 августа 2010 г.). Красновато-коричневые тона свидетельствуют о том, что растительность испытывает серьезный стресс, поскольку отражает относительно большое количество красного света. Возможно, что это изменившие цвет кроны хвойные деревья, засохшие в результате низового пожара. Вредители не могут вызвать столь быстрого изменения окраски. Поскольку данные наземного наблюдения отсутствуют, возможны лишь предположения.

Для оперативного анализа выделяется сектор со сторонами 420 м, с захватом пораженной и нормальной (рис. 2в) частей.

На рис. 3 представлены те же снимки, только в инфракрасном канале.

Для определения симптомов поражения используются параметры растительного покрова. RapidEye использует параметр NDVIRE (рис. 4а) для анализа состояния лесной и сельскохозяйственной растительности, NRGDVI (R-G)/(R + G) (рис. 4б) – для анализа жизнеспособности леса (CSI – показатель поражения полога).

График на рис. 5а показывает значения пикселей для определения индекса NDVIRE, определенного в обозначенном секторе. Низкие значения указывают на то, что растительность испытывает нагрузки. NRGDVI (показатель поражения полога; рис. 5б) указывает на то, что нагрузки на растительность возрастают, поскольку значения пикселей растут. На примере обоих параметров за-

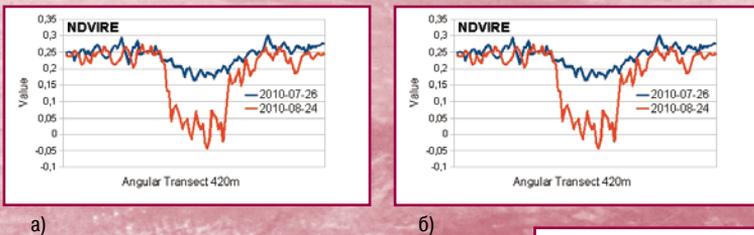
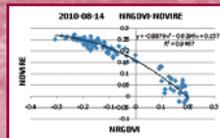


Рис. 5.

а. Индекс NDVIRE, двукратная съемка

б. Индекс NRGDVI, двукратная съемка

в. Сравнение индексов NDVIRE и NRGDVI



в)

метна разница между жизнеспособностью растительности в первый и второй дни съемки (26 июля и 14 августа). График на рис. 5в показывает, что оба параметра могут использоваться для определения жизнеспособности

леса. На этом примере видно, что разброс NRGDVI сильнее при более здоровой растительности и что он уменьшается, когда жизнеспособность снижается. NDVIRE используется для определения динамики повреждений, но в этом примере его разброс меньше при большей жизнеспособности.



Рис. 6.  
Снимки RapidEye  
а. 27 февраля 2010 г.  
б. 9 мая 2011 г.  
в. Изменения лесного покрова

### Мониторинг вырубки лесов в Чили

Мониторинг вырубки (или контроль лесозаготовок) основывается на сравнении снимков со спутников за две различные даты (рис. 6). С помощью этих снимков рассчитываются негативные изменения лесного покрова (вырубки леса). В зависимости от требований заказчика производится полигональный либо растровый мониторинг изменений. При благоприятных условиях достижима точность от 80 до 95% при минимальном выделе в 0,2 га, в зависимости от структуры леса и характера местности. Ограничения: облака, тени облаков, затененные области предгорий – могут давать ошибку. Алгоритм расчета динамики основывается на методе MAD (Multivariate Alteration Detection) [2]; алгоритм встроен в систему предварительной и окончательной обработки данных RapidEye.

### Мониторинг вырубки лесов в Российской Федерации

В данном примере рассмотрим ситуацию в Республике Коми. Как и в предыдущих случаях, для мониторинга вырубок здесь использованы снимки, полученные за две разные даты.

Для проведения анализа сравнивались снимки с индийского спутника IRS/LISS III и данные, полученные с RapidEye (рис. 7). Отметим, что из этого примера видно, что данные прошлых периодов с других спутников можно сравнивать со снимками RapidEye. Применялась обработка данных на основе алгоритма MAD; использовалась полигональная съемка при точности 95% с минимальным выделом 0,2 га. По полигонам легко вычисляются масштабы вырубки, которые в данном случае составили 935,45 га.

### Картографирование породного состава в Российской Федерации

Наземная инвентаризация отдаленных и обширных лесных районов и контроль вырубки в них требуют больших временных и трудовых затрат. Дистанционное зондирование не может полностью заменить наземного сбора данных, но может помочь в инвентаризации



Рис. 7.  
а. Снимок IRS/LISS III, 2007 г., приведенное разрешение 5 м  
б. Снимок RapidEye, 2010 г., разрешение 5 м  
в. Автоматически полученные полигоны изменений

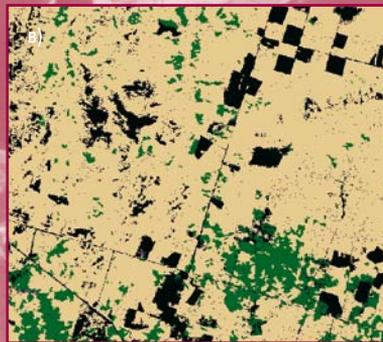
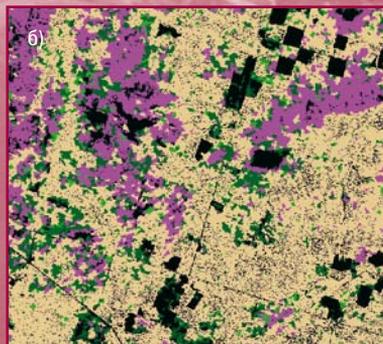


Рис. 8.  
Снимки RapidEye, 2009 г.  
а. ель  
б. сосна  
в. осина/береза

больших районов, поскольку позволяет описать распределение преобладающих пород древесной растительности при помощи геоestatистических моделей и получить достоверные инвентаризационные карты. Главным образом используются три метода оценки параметров леса: логистическая регрессия, метод kNN (ближайших соседей), вероятностный метод. В RapidEye используется метод оценки параметров леса [3]; расчет производится методом на основе данных вероятностей классов выборки [4, 5]. Для применения метода необходимо собрать как минимум 250 образцов, разбросанных по выбранной территории и представляющих широкий спектр возможных значений. При наличии точных не устаревших данных наземной съемки и при отсутствии дымки на космических снимках достижима точность до 80% при определении процентного распределения по-

род деревьев. На рис. 8 показаны примеры из тестового района в Республике Коми.

### Картографирование последствий ураганного ветра в Германии

Ураганные ветры случаются довольно часто. При помощи картографирования повреждений, причиненных ветром, в режиме реального времени можно оперативно оценить ущерб. По картам можно легко оценить ущерб на единицу площади или объема. Картографирование штормового ущерба является одним из сервисов RapidEye, который уже с успехом использовался на нескольких тестовых участках. Работа сервиса основана на анализе мониторинга изменений при двукратной съемке. Точность варьируется от 65 до 95% при минимальном 0,2 га, который зависит от характера леса и собственно повреждений.

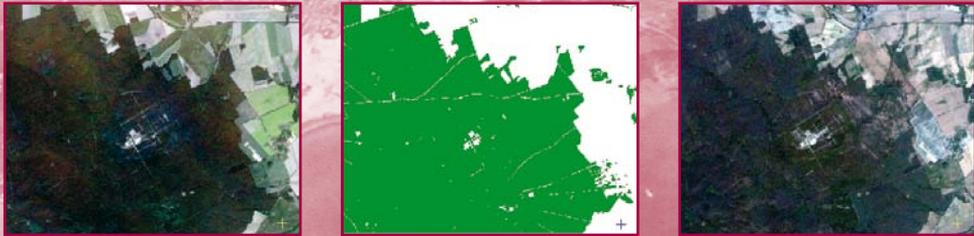


Рис. 9.  
а. снимок RapidEye, 25 августа 2009 г.  
б. маска леса  
в. снимок RapidEye, 5 июня 2010 г.



Рис. 10.  
а. выделение основного компонента по двум снимкам RapidEye  
б. результат обработки  
в. совмещение выделенных полигонов со вторым снимком

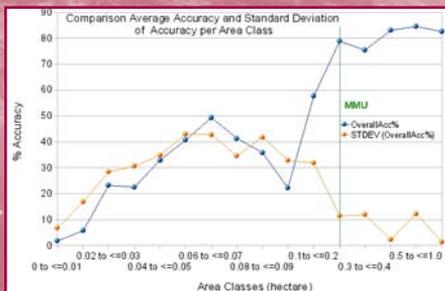


Рис. 11.  
Определение минимального выдела при картографировании последствий ураганного ветра

24 мая 2010 г. через Саксонию в юго-западном направлении пронесся ураган, оставив после себя бурелом, общий объем которого был оценен в 108 тыс. куб. м. Некоторые частные лесные владения были полностью разрушены. Крупные участки леса, уничтоженного катастрофой, пришлось на государственные леса. Были получены два снимка: от 25 августа 2009 г. и от 6 июня 2010 г. По первому снимку была выделена маска леса; для обоих снимков рассчитывались основные компоненты по всем каналам по этой маске. Результат анализа представлен на рис. 9 и 10.

Было установлено, что при минимальном выделе 0,2 га результат получается довольно точным. Это видно графика, приведенного на рис. 11. При сопоставлении данных наземного контроля (аэрофотоснимки с разрешением 20 см) с результатами классификации сравнивались минимальные выделы от 0,01 до 1 га по стандартным отклонениям от общей точности в данном классе площадей. Начиная с определенного класса площадей эти величины начинают сильно разниться, стандартное отклонение становится небольшим, точность возрастает. В точке, где расхождение вновь уменьшается, находится оптимальный выдел.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описание конкретных случаев практики ясно показывает, что спутниковая группировка RapidEye может применяться для оперативного мониторинга лесов. Высокое разрешение (размер пикселя 5 м) снимков системы RapidEye позволяет использовать минималь-

ный картографируемый выдел 0,2 га при высокой точности. Спектральные возможности группировки позволяют проводить анализ состояния растительности по самым различным параметрам. Например, можно рассчитать индексы NDVIRE и NRGDVI, которые позволяют оценить жизнеспособность лесного массива, зачастую отражающуюся на содержании хлорофилла в растениях. Поскольку группировка RapidEye состоит из 5 идентичных спутников, можно производить повторную съемку на больших площадях. Это позволяет производить анализ многих параметров лесов, для оценки которых требуется повторная или многократная съемка, например мониторинг лесозаготовок, незаконной рубки, жизнеспособности леса, бурелома.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jan Eitel; Lee Vierling; Marcy Litvak; Dan Long; Urs Schulthess; Alan Ager; Dan Order of Authors: Jan Eitel; Lee Vierling/Krofcheck; Leo Stoccheck 2011: *Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland*, Elsevier Editorial System(tm) for Remote Sensing of Environment, in Print
2. Allan Aasbjerg Nielsen et al. 1998: *Multivariate Alteration Detection (MAD) and MAF Postprocessing in Multispectral, Bitemporal Image Data: New Approaches to Change Detection Studies*, Remote Sensing of Environment, 1998 Vol 64 No. 1 pp. 1-19, Elsevier
3. Heikki Astola, Catherine Bounsaythip, Jussi Ahola, Tuomas Häme, Eija Parmes, Laura Sirro, Brita Veikkanen. *Highforest – Forest parameter estimation from high resolution remote sensing data*. Technical Research Centre of Finland, Information Technology (2003), Information Systems, P.O. Box 1201, FIN-02044 VTT, Finland
4. Häme, T.; Stenberg, P.; Rauste, Y. *A methodology to estimate forest variables at sub-pixel level*. – Conference on Remote Sensing and Forest Monitoring. Rogow, PL, 1 – 3 June 1999. European Communities (2000), s. 451 – 461.
5. Häme, T.; Stenberg, P.; Andersson, K.; Rauste, Y.; Kennedy, P.; Folving, S.; Sarkeala, J. *AVHRR-based forest proportion map of the Pan-European area*. – Remote Sensing of Environment. (2001) 77, s. 76 – 91.