

Е. Цильман (E. Zillmann; BlackBridge, Германия)

В 1999 г. окончил Технический университет в Берлине. После окончания аспирантуры работал в Научно-исследовательском отделении по сельскохозяйственному производству и лугам Университета г. Хохенгейм (Германия). С 2009 г. — специалист по разработке приложений научно-исследовательской группы компании RapidEye (ныне — BlackBridge). Кандидат естественных наук.

Р. Грисбах (R. Griesbach; BlackBridge, Германия)

В 1996 г. окончил Сибирскую государственную геодезическую академию, факультет аэрофотогеодезии. С 2007 г. работает в компании RapidEye (ныне — BlackBridge), в настоящее время — старший менеджер проектов научно-исследовательской группы компании. Кандидат технических наук.

Х. Вайхельт (H. Weichelt; BlackBridge, Германия)

В 1989 г. получил научную степень доктора физических наук. С 2005 г. работает в компании RapidEye (ныне — BlackBridge), в настоящее время — руководитель научно-исследовательской группы компании BlackBridge.

Применение данных ДЗЗ и ГИС-технологий органами государственной власти*

ПРОГРАММА CORPNICUS И ДЕТАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЛОИ

Для проведения экологического мониторинга, а также для информационной поддержки задач планирования и принятия решений необходимо постоянное обновление информации о состоянии окружающей среды Европы. Начиная с 1990 г. программа CORINE обеспечивает временные информационные ряды о почвенно-растительном покрове и землепользовании в Европе.

Несмотря на то что программа CORINE является достаточно успешным и востребованным проектом, спектр использования ее результатов ограничен, в частности, в связи с низким пространственным разрешением предоставляемой информации — 25 га. Более высокие требования, предъявляемые к информации о состоянии окружающей среды, в том числе более высокое пространственное разрешение и увеличение частоты обновления данных, создают необходимость в дополнительных информационных сервисах.

В настоящее время Европейское агентство по окружающей среде (EEA) выполняет функции

службы общеевропейского центра мониторинга земель (Corpnicus — Европейская программа по осуществлению мониторинга окружающей среды, ранее GMEs). В рамках данной программы будет создано пять детальных информационных слоев по различным типам земель с пространственным разрешением 20 м с целью дополнения уже существующих наборов данных CORINE. Детальные слои будут представлены следующими картами для 39 стран Европы (2012 [1]):

- ✦ степени непроницаемости;
- ✦ лесов (плотность лесного покрова и тип леса);
- ✦ постоянных лугов;
- ✦ водно-болотных угодий;
- ✦ постоянных водоемов.

Детальные информационные слои были созданы с использованием космических снимков, предоставленных Европейским космическим агентством (ESA). Архивы содержат практически полностью безоблачное съемочное покрытие на всю территорию Европы, полученное сенсором LISS-III (Linear Imaging Self Scanner), установленным на индийском спутнике IRS-P6 (RESOURCESAT-1), в течение вегетационного периода для каждой страны,

*Перевод с английского языка и подготовка к публикации Е. Н. Горбачевой (компания «Совзонд»).

а также полное покрытие данными съемочной системы RapidEye с пятиметровым пространственным разрешением, полученное приблизительно в тот же период времени (6 недель до или после съемки LISS-III).

Дополнительно разновременные снимки (минимум 5) были получены сенсором AWiFS (Advanced Wide Field Sensor), также размещенным на спутнике IRS-P6. Таким образом, использовались космические снимки 3 различных съемочных систем с пространственным разрешением от 5 до 60 м.

Все эти данные, а также полученные в результате их обработки детальные информационные слои в настоящее время находятся в свободном доступе для лиц, ответственных за принятие решений в Европейском союзе.

Компания BlackBridge в сотрудничестве с коллегами из INDRA (Испания), EUROSENSE (Бельгия) и DLR (Германия) разработала методику создания высокодетального слоя постоянных лугов. Кроме того, BlackBridge предоставляет исходные данные, необходимые не только для картографирования лугов, но также для разработки детальных слоев водно-болотных угодий и постоянных водоемов.

В данной статье рассмотрены преимущества концепции использования данных, полученных сенсором с оптимальным пространственным разрешением, совместно с данными сенсора, предоставляющего оптимальную разновременную информацию, при создании высокодетального слоя лугов Европы.

ТЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ

Луга занимают около 18,6% от общей площади Европейского союза (EU23), пахотные земли — приблизительно четверть (23,1%) [2]. Для лугов характерны сезонные и региональные различия в структуре. Поэтому для них не существует единой усредненной спектральной характеристики. Кроме того, точное разделение пастбищ и пахотных земель с использованием мультиспектральных спутниковых данных по-прежнему проблематично в связи с тем, что их спектральных характеристики и сезонная динамика могут быть чрезвычайно похожи.

Ряд исследований уже показали важность анализа временных рядов при выявлении фенологических вариаций сельскохозйственных культур и луговой растительности на протяжении вегетационного периода для улучшения точности классификации. Itzerott и Kaden [3] отделили сельскохозйственные посевы от лугов с использованием

разновременной спектральной информации на основании анализа нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI), рассчитанного по данным спутника Landsat. Тем не менее они наблюдали временные и региональные вариации индекса NDVI лугов и сельскохозйственных посевов, поэтому полученные ими результаты сложно применить в других регионах. Simonneau с соавторами [4] показали пригодность использования разновременных данных Landsat для усовершенствования идентификации различных культур. Они рассчитали профили динамики индекса NDVI для каждого пикселя и определили, что общая точность дешифрирования достигла 83,7% при использовании алгоритма «Дерево решений».

Использование разновременных изображений повышает точность классификации сельскохозйственных культур и луговой растительности, но еще более важным является наличие съемки в оптимальные сроки [5]. Оптимальные сроки съемки отличаются от региона к региону в зависимости от климатических условий, для разных сельскохозйственных культур и различных видов пастбищ. Moeller [6] доказал, что для Германии одни и те же даты съемки разных районов приходятся на различные фенологические фазы растительности, что обусловлено разнообразием природных условий страны. Таким образом, определение единой оптимальной даты съемки луговых угодий для всей Европы является сложной задачей и, вероятно, невозможно без дополнительной информации о погодных условиях, фенологии и высоте местности. Даже если оптимальный срок съемки был бы определен, по-прежнему остается проблематичным получение снимков хорошего качества (например, без облаков) в требуемый промежуток времени.

Для решения данной проблемы был разработан способ классификации с использованием сезонных статистик по различным вегетационным индексам, посчитанным на основании разновременных снимков и дополнительной текстурной информации. С целью обеспечения съемкой в требуемый период времени была разработана мультисенсорная концепция. Методика объединяет контролируруемую классификацию по методу «Дерево решений» с объектно-ориентированным подходом для анализа разновременных наборов данных, полученных с различных сенсоров. Данная методика, представляющая собой почти полностью автоматизированную цепочку обработки, в настоящее время применяется в 39 странах Европы (6 млн кв. км).

В данной статье представлены разработанные методики, а также результаты тематического исследования, проведенного в Венгрии.

МЕТОДИКА

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Ландшафты Венгрии относительно однородны и характеризуются преобладанием однотипного растительного покрова. Центральная и юго-восточная части страны расположены на обширных плоских равнинах, первоначально покрытых естественными лугами (степь), в западной части рельеф более холмистый. Пахотные земли занимают около 50% общей площади страны, луга — менее 20% [7].

КОСМИЧЕСКИЕ СНИМКИ И ИХ ОБРАБОТКА

Для исследования были использованы данные съемочных систем AWiFS, IRS-LISS-III и RapidEye (табл. 1) с диапазонами пространственного разрешения от 5 до 60 м, полученные с марта по октябрь 2011 и 2012 гг. Снимки предоставлены ESA. Временные ряды (состоящие по крайней мере из 6 снимков) обеспечивались данными сенсора AWiFS.

Принимая во внимание различные источники используемых данных, была разработана мультисенсорная концепция. Рассматриваемый рабочий процесс дешифрирования лугов Европы основан на четырех концептуальных направлениях:

- * деление территории на участки;
- * сезонные статистики биофизических параметров;
- * сегменты изображений;
- * классификатор по методу «Дерево решений».

Исследуемый район состоял из 15 участков, которые обрабатывались отдельно. Размер рабочего участка определялся площадью сцены LISS, поэтому сцены AWiFS были обрезаны, а снимки RapidEye объединены в мозаику. На территории отдельных участков в связи с неблагоприятными атмосферными условиями съемка на отдельные даты отсутствует. Разработка концепции обработки данных по участкам была необходима для реализации сложного автоматизированного процесса обработки данных из различных источников, разного пространственного разрешения и проекции.

Полностью автоматизированная цепочка обработки была разработана для извлечения различных биофизических (на каждую дату) и текстурных параметров (TPS) (единовременно для всего периода исследований) (табл. 2).

Перед обработкой значения всех пикселей изображений были преобразованы из условных единиц яркости в значения отражения, регистрируемые на верхней границе атмосферы. Параметры были получены в виде растровых файлов с закругленным до 20 м пространственным

разрешением в соответствии с разрешением датчика LISS.

Биофизические параметры были рассчитаны для каждой даты и сгруппированы во временные ряды на каждом участке для расчета статистических параметров по сезонам, таких, как минимальное, максимальное, среднее значение, дисперсия, среднее и стандартное отклонение по всему временному ряду. Кроме того, для каждого биофизического параметра за весь период наблюдения был рассчитан фенологический индекс (PI):

$$PI = (ABS(mean t - t1) + ABS(mean t - t2) + ABS(mean t - t3) + ABS(mean t - t4) + ABS(mean t - tn)) / Nt,$$

где ABS = unsigned value; $t1$ = time1; t = entire time series; and Nt = number of dates in the data series.

Рассчитываемые биофизические параметры позволяют отличать пахотные земли от лугов благодаря различной восприимчивости индексов к определенным свойствам растительности, а именно: к энергии прорастания, объему биомассы и количеству сухого вещества растений (рис. 1).

Сезонная статистика биофизических параметров используется для описания пространственно-временных изменений состояния растительного покрова, с целью отделения однолетних сельскохозяйственных культур от луговых, на основании различий в их спектральных характеристиках на протяжении вегетационного сезона. Использование сезонных статистик делает предлагаемую методику менее зависящей от наличия съемки на конкретные даты и отсутствия данных в связи с высокой облачностью. Сезонные статистические данные представляют собой интеграцию спектральной информации на различные даты съемки с последовательным временным рядом статистических переменных, полученных для каждого биофизического параметра.

Снимки LISS-III были обработаны на каждый участок с помощью программного обеспечения e-Cognition (компания Trimble) для осуществления сегментации космических снимков, отдельные сегменты которых в дальнейшем использовались как классификационные единицы. Использование объектно-ориентированного подхода классификации вместо субпиксельного минимизирует эффект неровной границы, обусловленный разным пространственным разрешением, и случаями небольших геометрических погрешностей входных изображений. Более того, использование сегментированных изображений позволяет быстро и точно создавать обучающие выборки, а также

Сенсор	Спектральные диапазоны*	Пространственное разрешение, м	Размер сцены, км	Съемка (количество покрытий)
IRS-P6/AWIFS	G, R, NIR, SWIR	60	370x370	5-8**
IRS-P6/LISS-III	G, R, NIR, SWIR	20	141x141	1
RapidEye	B, G, R, RE, NIR	5	25x25	1 (различные снимки объединены)

* В — синий, G — зеленый, R — красный, RE — крайний красный, NIR — ближний инфракрасный, SWIR — коротковолновой инфракрасный.
 **В зависимости от наличия изображений для той или иной области.

Табл. 1. Обзор использованных снимков

упрощает процесс редактирования результатов классификации.

Для каждого сегмента были получены усредненные значения рассчитанных ранее параметров. По окончании обработки каждому сегменту присваиваются значения следующих 50 переменных:

- * 5 сезонных статистик по каждому биофизическому параметру;
- * 1 фенологический индекс для каждого биофизического параметра;
- * 4 текстурных параметра на дату;
- * значения отражения в 4-х каналах LISS (для фазы наиболее активной вегетации).

КЛАССИФИКАЦИЯ

Классификация проводилась для каждого участка с использованием алгоритма C5 (классификатор «Дерево решений»). Выбор данного непараметрического алгоритма обусловлен тем, что он не зависит от распределения переменных, а также способен работать с большим количеством входных признаков. Алгоритм C5 создает набор правил принятия решений по обучающим данным, на основании концепции информационной энтропии [9]. Этот алгоритм использует только значимые признаки и избегает информационной избыточности.

Передовой адаптивный алгоритм определяет принадлежность к классу с использованием комбинации из 10 наборов решающих правил и генерирует надежные значения по каждому объекту классификации.

Обучающие данные для контролируемой классификации были получены на основании визуального дешифрирования космического снимка RapidEye (пространственное разрешение 5 м). На каждом рабочем участке вручную было отобрано по меньшей мере 90 образцов, принадлежащих к семи классам почвенно-растительного покрова (включая луга и пахотные земли). Отбор образцов и классификация были выполнены несколько

Биофизический параметр	Формула	Используемый сенсор
Ground Cover	[8] немного модифицированная	LISS III, AWiFS
NDVI	$(NIR - RED) / (NIR + RED)$	LISS III, AWiFS, RE 20 м
NDII	$(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	LISS III, AWiFS
PSRI	$(RED - GREEN) / NIR$	LISS III, AWiFS
NDSVI	$(SWIR - RED) / (SWIR + RED)$	LISS III, AWiFS
Wetness Index	$(RED + GREEN) / (NIR + SWIR)$	LISS III, AWiFS
Brightness	$(RED + GREEN + NIR) / 3$	LISS III, AWiFS
Текстурный параметр		
GLCM Homogeneity	Рассчитан по NIR	RE 5 м (заглубленный до 20 м)
GLCM Entropy	Рассчитан по NIR	RE 5 м (заглубленный до 20 м)
Edge Density	Основан на фильтре Собеля канала NIR	RE 5 м (заглубленный до 20 м)
Variance	Рассчитан по NIR	RE 5 м (заглубленный до 20 м)

Табл. 2. Обзор биофизических и текстурных параметров, извлеченных из изображений

раз (обычно 5), до того как был принят окончательный результат.

Так как алгоритм C5 предоставляет значения достоверности для каждого объекта классификации, все объекты, выделенные на снимке и классифицированные как луга со значениями достоверности

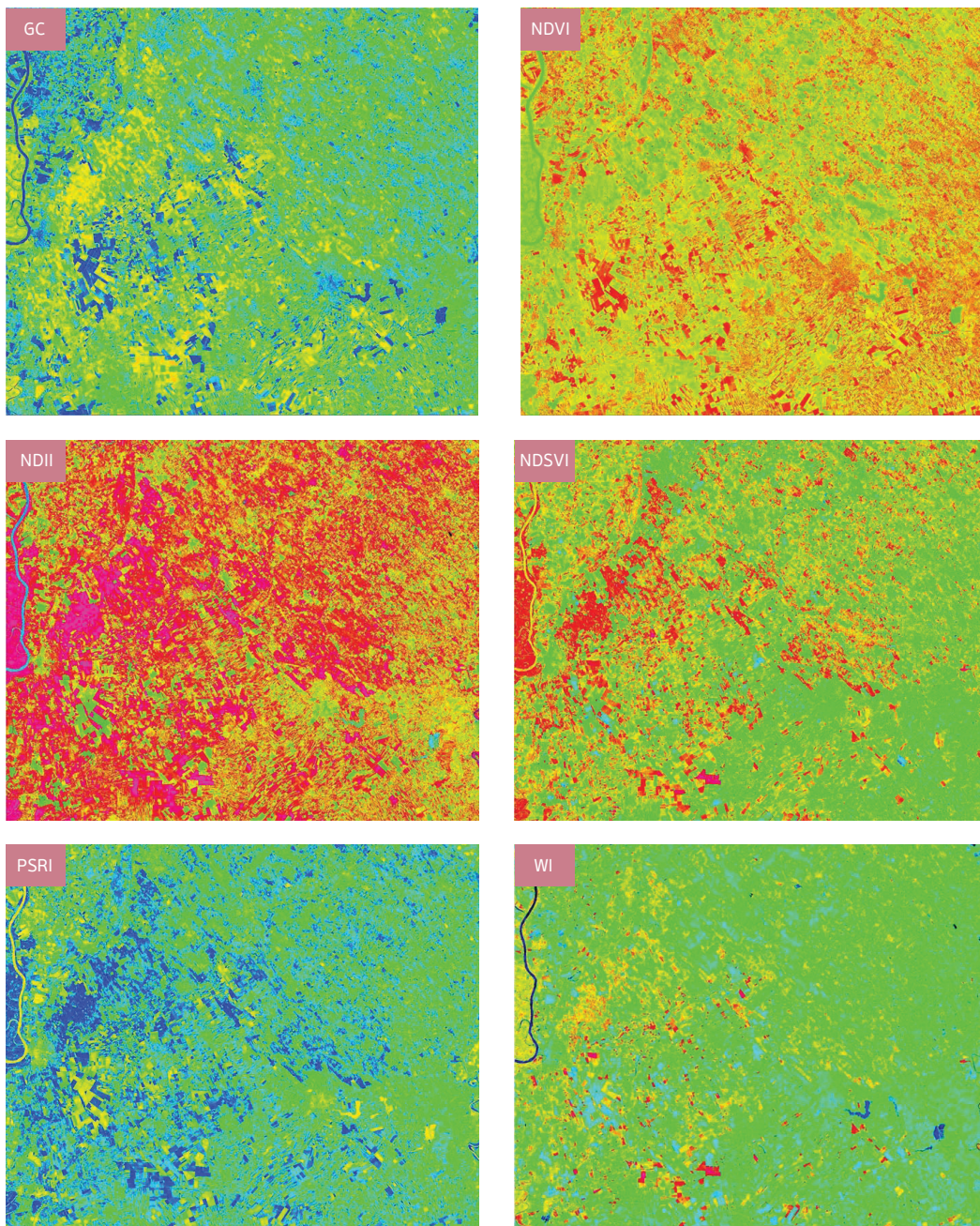


Рис. 1. Примеры биофизических параметров, использованных при классификации

более 0,6, будут считаться классифицированными правильно. После автоматической классификации была осуществлена ручная корректировка результата для удаления участков под виноградниками, сплошными рубками леса и реками, которые были неверно отнесены к классу лугов.

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ

Точность классификации лугов (луг / не луг) оценивалась с помощью случайных сравнительных выборок, полученных по данным Land Use and Cover Aera frame Survey [10], а также с использованием множества точек стратифицированной случайной выборки (всего 328 точек). Второй набор верификационных данных был создан на основе CORINE Land Cover, для того чтобы увеличить количество эталонных точек лугов. Интерпретация и проверка были основаны на пяти снимках RapidEye с пространственным разрешением 5 метров, а также на имеющихся данных очень высокого разрешения (VHR) и информационных слоях CORINE.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Общая точность классификации лугов составила 92,2% (табл. 3), с комиссионной погрешностью 5,3% и ошибкой от пропуска сигнала 11,3% для лугов. Поскольку оценка качества проводилась полностью для всей территории страны, закладке ключевых точек в пределах каждого участка не уделялось особого внимания. Таким образом, оценка точности проводилась только для участков, в пределах которых было отобраны образцы, как минимум в 40 точках.

Достоверность классификации для отдельных рабочих участков колебалась от 83 до 94% с ошибками (Commision) в пределах 0–13% и ошибками от пропуска сигнала (Omission) 38% или менее.

	Луг	Не луг	Всего	Commision
Луг	125	7	132	5,3%
Не луг	16	180	196	
Всего	141	187	328	
Omission	11,3%			92,2%

Табл. 3. Оценка качества разновременной классификации лугов

Большинство этих ошибок обусловлены неверной классификацией пахотных земель и пастбищ, что говорит о необходимости увеличения количества разновременных данных для более точного распознавания типов угодий. Вероятно, что некоторые наблюдения, необходимые для

учета потенциально существующих различий в значениях отражения лугов и сельскохозяйственных культур, не были учтены. Однако интенсивно эксплуатируемые луга могут иметь одинаковые с определенными типами культур фенологические модели, и, следовательно, даже больший временной охват не улучшит результат классификации.

Зачастую сегменты, содержащие как травы, так и пахотные земли, были классифицированы как не луга, что привело к неверному результату классификации. Распространенность данного типа ошибки зависит от степени фрагментации сельскохозяйственного ландшафта, которая должна определяться в каждом конкретном случае отдельно. Другим источником неверной сегментации является дата съемки снимков LISS-III, являющихся основой сегментации изображения. В зависимости от даты съемки фенологические стадии и соответствующие спектральные характеристики отражения отдельных культур и лугов могут быть очень похожи, что делает невозможным точное разделение этих двух классов.

Эта проблема может быть решена заменой данных LISS-III данными RapidEye, которые имеют гораздо более высокое временное, а также лучшее спектральное и пространственное разрешение. Цепочка обработки может быть полностью переведена на использование данных RapidEye. Уже сейчас данные RapidEye были использованы для расчета текстурных параметров.

Использование текстурных параметров в процессе классификации было вызвано необходимостью решения проблемы смешанных типов покрытий, представленных усредненным спектральным значением в пределах сегмента. Анализ набора правил показал, что параметры текстуры были учтены, но сильно не повлияли на общий результат классификации (рис. 2).



Рис. 2. Пример карты постоянных лугов, наложенной на космический снимок

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большое количество разнотипных входных данных делает процесс классификации луговых угодий Европы затруднительным с точки зрения его организации и обработки.

Методика, основанная на разновременных данных различных съемочных систем, была разработана и успешно применена для классификации лугов на всей территории Европы. Объектноориентированный подход использует алгоритм С5 контролируемой классификации «Дерево решений» в сочетании с разновременными переменными, извлеченными из сезонных статистик биофизических параметров, что позволяет осуществлять интеграцию разнотипных источников данных с последующим увеличением частоты отбора проб в пределах заданного промежутка времени.

Достигнутый уровень автоматизации обеспечивает возможность эффективного применения технологии для картографирования лугов практически по всей Европе в пределах заданных сроков. Точность дешифрирования лугов составила 80% для всех стран, в которых уже была применена данная технология. Способ оказался точным и достаточно эффективным, для того чтобы соответствовать требованиям Европейского агентства по окружающей среде (ЕЕА).

Изложенная выше технология была разработана на основе требований, предусмотренных ЕЕА, поэтому должны были использоваться указанные источники данных. Однако в качестве исходных данных разработанной методики могут применяться и отличные от заданных наборы данных. Снимки RapidEye обладают достаточным радиометрическим и временным разрешением, а также более высоким пространственным разрешением и могут использоваться в качестве основного источника данных (вместо SPOT, LIS-III). При применении технологии идентификации лугов на обширных территориях эффективно использование снимков RapidEye в комбинации со снимками более низкого пространственного разрешения, например, с находящимися в свободном доступе данными Landsat-8.

Полученные детальные тематические слои, такие, как слой лугов, уже доступны для европейских правительственных организаций, причем планируется обеспечение регулярного обновления данных. Это, безусловно, оптимизирует процесс принятия решений на разных уровнях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Langanke, G. Büttner, H. Dufourmont and C. Steenmans, "High Resolution land cover mapping on continental scale for 39 European countries. Context – status – applications – future developments", *ISRSE35, Int. Symp. On Rem. Sens. Of Env.*, 22-26-April 2013, Beijing.
2. EUROSTAT, "Agriculture and Fishery statistics – Main results 2009-10", 2011, ISBN: 978-92-79-20424-1; [Online]. Available: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-FK-11-001/EN/KS-FK-11-001-EN.PDF, (DOI): 10.2785/15223.
3. S. Itzerott and K. Kaden, "Klassifizierung landwirtschaftlicher Fruchtarten", *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (PFG)*, pp. 109-120, 2/2007.
4. V. Simonneaux, B. Duchemin, D. Helson, S. Er-Raki, A. Oliosio and A.G. Chehbouni, "The use of high-resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in central Morocco", *Int. J. of Rem. Sens.*, 29(1), 2008, pp. 95-116.
5. M. Keil, A. Metz and S. Nieland, "Begleitende Arbeiten zur Aktualisierung von CORINE Land Cover 2006", Abschlussbericht, UBA Auftrag Z6 - 00335 4218, DLR-DFD Oberpfaffenhofen (internal report to the German Federal Environment Agency).
6. M. Möller, C. Gläßer and J. Birger, "Automatic interpolation of phenological phases in Germany". *Proc. of MultiTemp2011, 6th International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images*, pp. 37-40, Trento, Italy, June 2011
7. EUROSTAT, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Land_cover,_land_use,_and_landscape, 2011.
8. S.J. Maas and N. Rajan, "Estimating Ground Cover of Field Crops Using Medium-Resolution Multispectral Satellite Imagery." *Agronomy Journal* 100(2), 2008, pp. 320-327.
9. J.R. Quinlan, "C4.5: Programs for Machine Learning", Morgan Kaufmann Publishers, 1993.
10. LUCAS, Land Use and Cover Area frame survey, Eurostat, *Statistics in Focus* 21/2011.