Автоматическое распознавание используемых пахотных земель на основе сезонных временных серий восстановленных изображений Landsat

Д. Е. Плотников, П.А. Колбудаев, С.А. Барталев, Е.А. Лупян

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru

В работе рассматривается метод ежегодного автоматического распознавания используемых пахотных земель на основе сезонных временных серий восстановленных изображений Landsat (ETM+, OLI). Метод предусматривает использование спектрально-динамических признаков выявления пахотных земель, извлекаемых из временных серий значений вегетационных индексов и измерений коэффициентов спектральной яркости в красном, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах длин волн. Для достижения требуемой для автоматического распознавания пахотных земель частоты временных серий был использован метод восстановления пропущенных измерений на основе пространственно-временных связей между похожими объектами. Для учёта изменчивости почвенно-климатических условий и применяемой агротехники выращивания сельскохозяйственных культур на протяжённых территориях исследуемых регионов был использован программный комплекс локальноадаптивной классификации LAGMA с непараметрическим классификатором Random Forest. Валидация полученных карт пахотных земель Московской области и Приморского края на уровне пикселей Landsat была выполнена на основе наземной информации и экспертной интерпретации спутниковых данных высокого и сверхвысокого пространственного разрешения для территорий Каширского и Октябрьского районов, входящих в состав этих субъектов. Общая точность распознавания используемых пахотных земель Московской области составила 88,7%, а Приморского края — 84,4%.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, пахотные земли, распознавание, Landsat, восстановление временных серий, пространственно-временной анализ

Одобрена к печати: 05.04.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-112-127

Введение

В течение последних десятилетий площади используемых пахотных земель России претерпевали значительные и неоднородные изменения (Росстат, www.gks.ru), последствия которых продолжают отражаться на состоянии и динамике экосистем многих регионов страны (Люри и др., 2010). Вызванные антропогенным воздействием комплексные изменения водного, воздушного и теплового режимов пахотного слоя, характеристик почвы и грунтовых вод зачастую сопутствуют смене типов землепользования. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) хорошо зарекомендовали себя для оценки интенсивности и направления развития этих процессов, в том числе на больших территориях, ввиду их доступности, объективности, оперативности получения и глобальному покрытию.

Возможностям использования спутниковых данных Landsat для решения локальных задач мониторинга и оценки земель сельскохозяйственного назначения посвящено значительное число исследований (Hua et al., 2017; Xu et al., 2017; Yan, Roy, 2016). В частности, ряд работ предлагают подходы для дистанционного распознавания культур и используемых пахотных земель в масштабах региона (Иванов и др., 2017; Förster et al., 2012; Maxwell, Craig, 2008; Xu et al., 2017; Zhao et al., 2017). Вместе с тем попытки расширения регионов мониторинга наталкиваются на проблемы неоднородности рядов данных Landsat по причине низкой повторяемости наблюдений и связанной с этим повышенной чувствительностью получаемых результатов к наличию мешающих факторов. Единственные в настоящее время глобальные карты земного покрова с разрешением 30 м были созданы институтами Китайской академии наук в рамках проекта GlobeLand30 (Chen et al., 2015) по состоянию на 2000 и 2010 гг. и содержат в своей легенде класс пахотных земель, охватывающий и территорию России. Однако используемое в рамках проекта определение класса пахотных земель не описывает действительный статус их используемости в обозначенные годы. Кроме этого, технология получения карты требовала вовлечения большого количества экспертов на этапе классификации, что исключало возможность воспроизведения полученных результатов. Картографирование используемой пашни России с высоким пространственным разрешением на основе автоматических подходов, предполагающих повторяемость и объективность оценок, а также высокую скорость получения результатов, остаётся актуальной и нерешённой задачей. Ввиду протяжённых размеров Российской Федерации ежегодное распознавание используемых пахотных земель на больших территориях национального и субнационального уровня с высокой (десятки метров) детальностью представляется невозможным без использования автоматических технологий распознавания и высокоскоростного доступа к базе данных спутниковых изображений.

Сезонные и многолетние временные серии коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) и вегетационных индексов доказали свою незаменимость при разработке автоматических методов дистанционного распознавания пашни. Основанные на особенностях сезонной или многолетней динамики спектрально-отражательных характеристик признаки распознавания пашения пахотных земель в настоящее время успешно используются автоматическими методами, предназначенными для работы на больших территориях национального и континентального охвата (Плотников и др., 2010; Bartalev et al., 2016; Waldner et al., 2015). Учитывая высокую временную изменчивость сельскохозяйственной растительности, только системы с близкой к ежедневной повторяемостью наблюдений позволяют в условиях наличия мешающих наблюдениям факторов обеспечить построение частых временных серий, необходимых для извлечения фенологических характеристик и создания признаков распознавания.

Развитие автоматических методов предварительной обработки данных ДЗЗ и рост вычислительных мощностей в течение последнего десятилетия сделали возможным построение технологии ежегодного картографирования используемой пашни по данным прибора MODIS на территорию РФ и регионов соседних стран (Барталев и др., 2016; Плотников и др., 2010). Это позволило получить не имеющую в настоящее время аналогов по территориальному охвату и пространственной детальности серию ежегодно обновляемых карт пахотных земель России с разрешением 250 м. Полученные результаты указывают на значительный потенциал увеличения точности распознавания небольших полей в условиях преимущественно несельскохозяйственных ландшафтов средней полосы Европейской России, Центральной Сибири и Дальнего Востока при использовании спутниковых систем детальной съёмки. Несмотря на небольшие размеры полей, низкую региональную долю используемой пашни и небольшой вклад в национальный валовой сбор ключевых культур, эти регионы являются зоной активных изменений режимов землепользования, зарастания и заболачивания сельскохозяйственных земель, имеющих масштабные экологические последствия (Люри и др., 2010). Важнейшим практическим вопросом является оценка пригодности заброшенных земель и затрат на их восстановление в целях дальнейшего использования, в том числе на региональном уровне. Принимая во внимание необходимость объективного и регулярного контроля протекающих на землях сельскохозяйственного назначения процессов, можно сделать вывод, что развитие имеющейся технологии на основе использования спутниковых данных высокого пространственного разрешения является востребованным. Однако, будучи безальтернативным источником информации для дистанционного распознавания сельскохозяйственных полей малых размеров, спутниковые системы детальной съёмки не позволяют обеспечить необходимую для построения информативных признаков распознавания растительности частоту безоблачных наблюдений.

В настоящей работе описывается метод и результаты автоматического распознавания используемых в текущем сезоне вегетации пахотных земель Приморского края и Московской области на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения. Для снятия ограничений на частоту повторных дистанционных измерений был использован метод воссоздания частых временных серий высокого пространственного разрешения, основанный на локализованном поиске объектов земного покрова со схожей многолетней динамикой изменения спектрально-отражательных характеристик (Плотников и др., 2016, 2017). Установление пространственно-динамических связей внутри группы близкорасположенных похожих объектов земного покрова позволяет достаточно точно спрогнозировать значение КСЯ любого представителя этой группы за счёт достигаемой в процессе поиска статистической избыточности. Эти закономерности позволили воссоздать отсутствующие ввиду влияния различных факторов (облачность, тени от неё, сбойные фрагменты изображения) измерения за текущую дату, как если бы они были выполнены в безоблачных условиях. Указанный метод был применён для восстановления временных серий изображений в красном, ближнем инфракрасном (ИК) и коротковолновом ИК-каналах спутниковой системы Landsat для бесснежных периодов 2015 и 2016 гг. на территории Приморского края и Московской области соответственно. В работе показано, что частота восстановленных серий данных обеспечивает возможность построения информативных признаков распознавания и далее — карт используемой пашни, а результаты валидации полученных карт указывают на перспективность разработанных подходов.

Предварительная обработка данных спутниковой системы Landsat

Метод восстановления данных на основе пространственно-динамических связей требует минимизации влияния мешающих факторов, искажающих наблюдаемые характеристики участков земной поверхности на спутниковых изображениях. Повышенные требования к качеству исключения мешающих факторов подразумевали ужесточение критериев фильтрации участков облачности и теней, что приводит к почти гарантированному, хотя и избыточному, маскированию указанных объектов. Формирование маски облачности на изображениях Landsat, полученных приборами OLI и ETM+, осуществляется модифицированным алгоритмом FMASK (Колбудаев и др., 2016) на основе калиброванных значений спектральной яркости на уровне верхней границы атмосферы, рассчитываемых с использованием продукта L1T. Модификация алгоритма, в частности, предусматривает более точную идентификацию краёв облаков и теней, а также дополнительное исключение пикселей, соответствующих участкам полупрозрачной облачности. Получаемые таким образом маски пикселов, находящихся под влиянием мешающих факторов, применяются к прошедшим атмосферную коррекцию изображениям Landsat уровня обработки L2 в красном, ближнем и среднем ИК-каналах, оставляя для дальнейшего анализа неискажённые измерения КСЯ на уровне земной поверхности. В результате предварительной обработки был сформирован трёхлетний временной ряд безоблачных атмосферно-скорректированных изображений Landsat на всю территорию рассматриваемых регионов.

Восстановление временных серий изображений высокого пространственного разрешения

Средняя периодичность повторной съёмки двумя спутниками серии Landsat (No. 7 и No. 8) составляет около восьми дней в средней полосе России и южнее, формируя серии из 20–25 наблюдений за бесснежный период каждого года. Облачность, тени от неё, а также частичная поломка сканирующей системы прибора ETM+ и другие факторы приводят к существенному снижению числа безоблачных наблюдений земной поверхности (*puc. 1*, см. с. 115), пригодных для дальнейшего анализа и выявления динамично изменяющихся объектов, таких как сельскохозяйственная растительность.



Рис. 1. Пространственное распределение количества дистанционных наблюдений спутниковой системой Landsat для Московской области и её окрестностей в 2016 г.: *а* — всех наблюдений и *б* — безоблачных наблюдений

Итоговое количество безоблачных наблюдений и их не всегда равномерное распределение внутри сезона зачастую не удовлетворяет минимальным требованиям для формирования признаков распознавания используемой пашни, основанных на временных сериях измерений. Так, в ряде случаев набор имеющихся безоблачных наблюдений не способен описать ключевые характеристики сезонной динамики КСЯ или вегетационных индексов, такие как скорость роста кривой, сезонные максимум и минимум.

Метод для воссоздания частых временных серий спутниковых данных основан на локализованном поиске объектов земного покрова со схожей многолетней динамикой измерений спектрально-отражательных характеристик (эталонов). Элементарными объектами выступают динамически-однородные участки земной поверхности, сформированные в результате сегментации временных серий безоблачных изображений разработанным ранее методом (Плотников, 2014). Схожесть объектов оценивается на основе двух метрик: коэффициента корреляции Пирсона *K* и среднего относительного расстояния *D* между сравниваемыми временными сериями синхронных дистанционных измерений характеристик этих объектов (например, КСЯ). Для обеспечения требования о нормальности распределения значений КСЯ, лежащего в основе расчёта используемых метрик, анализируемый набор данных включал трёхлетний временной ряд последовательных безоблачных наблюдений. Такой интервал позволяет оценивать спектрально-динамические связи между объектами на основе нескольких десятков пар синхронных измерений, обеспечивая достоверность выводов о наличии или отсутствии закономерностей.

На начальном этапе метод осуществляет пространственный анализ окрестностей каждого полученного с помощью сегментации объекта земного покрова из региона исследования, содержащего пропущенные измерения в текущем сезоне вегетации. Это позволяет оценить значимость и достоверность спектрально-динамических связей объекта с предполагаемыми эталонами, а также их количество и вес их возможных оценок. Пространственный анализ предполагает разбиение всей исследуемой территории на фрагменты одинакового размера d. Для обеспечения статистической избыточности и пространственной репрезентативности при восстановлении пропущенных измерений внутри рассматриваемого фрагмента каждый соседний фрагмент из окрестности радиусом R должен предоставить некоторое минимальное количество *N* эталонов, которые удовлетворяют пороговым значениям на тесноту связей по критерию корреляции K_0 и расстояния D_0 . Найденные эталоны ранжируются: наибольший приоритет получают те объекты, которые характеризуются максимальным количеством пар синхронных безоблачных наблюдений по отношению к восстанавливаемому объекту при минимальном значении общего расстояния P = D/(K+2). Вес оценок эталонов связан со значением общего расстояния до целевого объекта по формуле $w = P_0 - P$, где $P_0 = D_0/(K_0 + 2)$. Для ускорения поиска объектам ставится в соответствие пополняемый и ранжируемый пул эталонов, элементы которого могут дополнять друг друга и обеспечивать необходимый объём пространственно-распределённой статистики. Это оказывается востребованным, в частности, при восстановлении измерений одного объекта за различные даты, когда некоторые из найденных ранее эталонных объектов оказываются под влиянием облачности, положение и размеры которой в общем случае носят случайный характер.

Второй этап заключается в расчёте прогнозируемых значений КСЯ восстанавливаемого объекта на основе оценок, предоставляемых множеством найденных эталонов. На этом этапе найденные в процессе поиска спектрально-динамические связи между парой похожих объектов с индексами *i* и *j* аппроксимируются линейной зависимостью $L_j = aL_i + b$, где буквой Lобозначены измерения дистанционных характеристик восстанавливаемого и эталонного объектов. По мере снижения контролируемых пороговыми значениями К₀ и D₀ различий между многолетними рядами спектрально-динамических характеристик пары похожих объектов коэффициент линейной регрессии а стремится к единице, а коэффициент b — к нулю. Коэффициенты линейной регрессии вычисляются методом наименьших квадратов. В формировании прогнозного значения КСЯ целевого объекта участвуют все удовлетворяющие пороговым условиям эталоны, содержащие безоблачные измерения характеристик земной поверхности. При этом по причине возможного неполного исключения влияния мешающих факторов исходные значения L_i некоторых эталонов могут быть искажены, что приведёт к несоответствию их оценки прогнозу большинства остальных эталонов. Оценки L_i, не удовлетворяющие условию $|L_i - M_L| < 3\sigma$, где M_L — среднее значение всех оценок, а σ — дисперсия оценок, исключаются из дальнейшего рассмотрения как несогласованные. Восстановленное значение объекта рассчитывается путём взвешивания оставшихся согласованных оценок

по формуле $L_j = \sum_{i=1}^n w_i L_i / \sum_{i=1}^n w_i$, где n — общее количество используемых для формирования

прогноза эталонов.

Восстановление изображений осуществлялось для всех дат текущего сезона вегетации, для которых суммарная площадь участков, обеспеченных безоблачными измерениями, внутри любой локальной области анализа радиусом R превышала 40% площади всей области анализа. Отметим, что причина отсутствия измерений не играет роли. Так, метод восстановления на основе спектрально-динамических связей позволяет синтезировать и изначально отсутствующие значения, например, если они находились вне зоны съёмки или ввиду частичной неисправности сенсора.

Восстановление временных серий спутниковых данных описанным методом позволило увеличить среднюю частоту информативных измерений более чем вдвое. Успешность восстановления текущего изображения зависела от доли пропущенных измерений внутри зоны поиска: чем меньше их количество, тем точнее и полнее оказывался результат восстановления. Для получения регулярных временных рядов наблюдений на уровне отдельных пикселей изображений на заключительном этапе использовалась интерполяция временных серий восстановленных измерений на основе скользящего полинома второй степени (Плотников и др., 2014). Помимо собственно интерполяции, этот подход позволил восстановить часть пропущенных измерений, ошибочно отнесённых к облачности или теням от неё, если их исходные значения, также анализируемые этим методом, соответствовали восстанавливаемой в процессе интерполяции кривой сезонных изменений дистанционных характеристик. Примеры поэтапного восстановления изображений на основе описанных подходов приведены на *рис. 2* (см. с. 117).



Рис. 2. Примеры восстановления изображений Landsat для части территории Московской области (*cверху*) и Приморского края (*cнизу*): исходные изображения после фильтрации облачности и теней (*слева*), результат восстановления (*в центре*), результат заполнения оставшихся после восстановления пропусков с помощью интерполяции (*справа*)

Признаки распознавания используемой пашни

Описанный подход позволил восстановить сезонные временные серии высокого пространственного разрешения для всей территории Московской области и Приморского края. Примеры временных рядов исходных и восстановленных измерений на пиксельном уровне для различных типов земного покрова регионов исследования приведены на *рис. 3* (см. с. 118). В некоторых случаях воссоздание сезонной динамики КСЯ происходило в условиях чрезвычайно низкого количества исходных наблюдений, препятствующих определению ключевых характерных элементов кривой, таких как минимальное или максимальное значения (например, *рис. 36*).

Ввиду квазирегулярного характера съёмки спутниковой системой Landsat для восстанавливаемых участков земной поверхности, где интервалы между повторными наблюдениями могут составлять 1, 6, 7 и 8 дней при использовании двух спутников, временные серии восстановленных измерений КСЯ в красном, ближнем и среднем ИК-диапазонах длин волн были интерполированы с ежедневной частотой для гармонизации рядов наблюдений. В дальнейшем для вычисления признаков распознавания применялся недельный временной интервал, полученный путём прореживания ежедневных измерений, что позволило эффективно учитывать частоту действительных наблюдений земной поверхности, избегая при этом излишнего увеличения объёма обрабатываемой информации. В частности, недельный временной интервал оказывается достаточным для распознавания используемых пахотных земель по данным MODIS (Плотников и др., 2010; Bartalev et al., 2016).

Рис. 3. Примеры сезонных временных рядов исходных (круглые метки) и восстановленных (сплошная линия) измерений КСЯ в ближнем ИК-диапазоне для различных типов растительного покрова: участка используемых пахотных земель (*a*), луговой (*б*) и лесной (*в*) растительности; по оси абсцисс отсчитывается номер дня в году

Рис. 4. RGB-синтез разновременных восстановленных изображений Landsat для территории Московской области (*слева*) и Приморского края (*справа*)

Полученные временные серии высокого пространственного разрешения позволяют обнаружить связанную с наличием севооборота сезонную динамику КСЯ участков используемых пахотных земель, которая отличает их от других типов растительного покрова и лежит в основе спектрально-динамических признаков распознавания. Так, разновременной синтез временной серии восстановленных изображений на *рис. 4* позволяет визуально выявить используемые сельскохозяйственные поля, отличающиеся многообразием цветовых оттенков из-за различий сезонной динамики расположенных на них культур, и отличить их от других типов растительного покрова, которые имеют серые оттенки ввиду незначительной сезонной изменчивости.

В используемой в настоящее время технологии (Барталев и др., 2016) для распознавания пахотных земель по данным MODIS задействованы три спектрально-динамических признака, извлекаемые из многолетних временных серий значений перпендикулярного вегетационного индекса PVI (Richardson, Weigand, 1977): SGPI, CEMI и AMMI (Bartalev et al., 2016). Эти индексы призваны максимизировать имеющиеся различия многолетних рядов дистанционных наблюдений для классов естественной растительности и пахотных земель ввиду наличия на участках последних севооборота. Так, SGPI выявляет минимальную для ряда лет ширину сезонной кривой PVI на полувысоте амплитуды, CEMI выбирает минимальное из ряда лет среднее значение PVI в период посевных работ, обнаруживая участки обрабатываемой почвы, а AMMI позволяет детектировать участки существенного межгодового изменения объёмов зелёной биомассы. Математические формулы для вычисления, детальное описание характеристик и информативности этих спектрально-динамических индексов для решения задачи распознавания используемой пашни описаны в работах (Барталев и др., 2011; Плотников и др., 2010; Bartalev et al., 2016). Поскольку указанная технология подразумевает картографирование пашни по данным MODIS с разрешением 250 м, в качестве входных данных в ней используются измерения только в красном и ближнем ИК-диапазонах длин волн, которые обладают указанной пространственной детальностью. На основе этих каналов вычисляется вегетационный индекс PVI и производные от него спектрально-динамические признаки.

Спутниковая система Landsat позволяет дополнительно использовать, в частности, данные коротковолнового ИК-диапазона (SWIR), который, наряду с красным и ближним ИК, также характеризуется пространственным разрешением 30 м и является информативным для выявления пахотных земель (Waldner et al., 2015). В указанной работе были предложены исследованные на примере участков глобальной сети JECAM (www.jecam.org) признаки распознавания используемой пашни, основанные на использовании измерений в SWIR-диапазоне. В частности, признаки SWIR_NDVI_{max} и SWIR_NDVI_{min} представляют собой значения КСЯ в этом канале, которые соответствуют сезонным максимуму и минимуму NDVI соответственно. Аналогично могут быть построены признаки для других диапазонов длин волн, например RED_NDVI_{max} и RED_NDVI_{min}, основанные на измерениях в красном канале приборов OLI и ЕТМ+. Помимо высокого пространственного разрешения, особенностью используемых далее в работе признаков является более короткий временной интервал дистанционных наблюдений, на основе которых они были рассчитаны. Описанные выше признаки SGPI, AMMI, СЕМІ использовали многолетние временные серии данных, однако распознавание пахотных земель текущего сезона вегетации в рамках этой работы требовало использования одного года для их построения.

Таким образом, в целях выявления используемых пахотных земель Московской области и Приморского края был построен набор признаков распознавания, основанных на сезонных временных сериях восстановленных измерений высокого пространственного разрешения, включающий в себя SGPI и CEMMI, а также признаки, основанные на сезонных временных сериях измерений КСЯ в красном и ближнем ИК-каналах SWIR\RED_NDVI_{max} и SWIR\RED_NDVI_{max} и SWIR\RED_NDVI_{max} и SWIR\RED_NDVI_{max} и SWIR\RED_NDVI_{min} (*puc. 5*). Признак AMMI не может быть рассчитан с использованием одного года наблюдений Landsat, поскольку нацелен на выявление межгодовых вариаций зелёной биомассы.

Рис. 5. Изображения признака CEMI, рассчитанного на основе восстановленной сезонной временной серии изображений Landsat для участков Московской области (*слева*) и Приморского края (*справа*), приведённых на *рис. 4*

Рисунок 5 представляет собой изображение признака CEMI на часть территорий Московской области и Приморского края, характеризуемых наличием участков используемых пахотных земель. Как правило, эти участки имеют заметно более низкие значения CEMI ввиду проведения в весенне-летний период полевых работ, технология которых предполагает экспозицию открытой почвы. Соответствующие открытой почве низкие значения PVI приводят к понижению значений CEMI, рассчитываемого как среднее значение перпендикулярного вегетационного индекса в весенне-летний период. Участки других классов в этот период характеризуются растительным покровом разной степени сомкнутости, которому соответствуют более высокие значения индекса PVI как индикатора зелёной биомассы.

Изображения признаков, полученных на основе исходных безоблачных временных серий Landsat, оказываются малопригодными для распознавания пашни из-за их высокой неоднородности, вызванной малым количеством и выраженной пространственной диспропорцией числа безоблачных наблюдений в течение сезона.

Опорные данные и классификация

Поскольку ряд использованных в работе признаков распознавания пашни и естественной растительности характеризуется неодномодальным распределением внутриклассовых значений, выявление пахотных земель осуществлялось на основе непараметрического классификатора Random Forest (Breiman, 2001). Кроме этого, наблюдаемая изменчивость почвенно-климатических и агротехнических условий возделывания пашни внутри регионов исследования потребовала использования локально-адаптивного метода распознавания LAGMA (Bartalev et al., 2014).

Опорная информация о пространственном распределении классов была получена из актуальной карты TerraNorte RLC (Барталев и др., 2015, 2016), построенной по данным прибора MODIS с разрешением 250 м и ежегодно обновляемой в ИКИ РАН на основе автоматических методов обработки спутниковых данных. Карта содержит легенду из 22 тематических классов, 18 из которых соответствуют различным типам растительности. В рамках упомянутой выше технологии класс используемых пахотных земель карты RLC оценивается на основе наблюдений прибором MODIS за шесть последовательных лет, последним из которых является год актуализации карты. Однако столь длинный временной интервал анализа может снижать достоверность определения класса пашни в случаях относительно быстрых изменений режимов землепользования. Существенно более высокая пространственная детальность спутниковых данных Landsat также требует учёта при ассимиляции тематической информации, полученной по данным MODIS.

Для решения задач пространственной детализации и актуализации обучающей выборки был использован, во-первых, метод выявления однородных участков растительности (Плотников, 2014) с помощью сегментации временных серий Landsat, и во-вторых, подход для итеративного улучшения обучающей выборки через повторные классификации с обучением. Первый подход предполагает, что определённые путём сегментации сезонных изображений однородные участки растительности представляют собой единый тематический класс, который на начальном этапе соответствует классу карты RLC. В случае соответствия сегменту множества пикселей карты, представляющих более одного класса RLC, результирующий класс сегмента считался неопределённым, и такой сегмент далее не рассматривался. Кроме этого, из выборки исключались сегменты малой площади (менее 10 га), поскольку их размеры, с учётом вносимой использованием данных MODIS погрешности географической привязки, оказываются сопоставимы с размером пикселя карты RLC. Второй подход использует предположение об актуальности и статистическом преобладании правильно распознанных пикселей карты RLC, за исключением, возможно, класса используемой пашни. Сформированная на начальном этапе с учётом этих предположений обучающая выборка в дальнейшем проходит через последовательные коррекции, когда результат классификации текущей итерации используется для уточнения предыдущей версии выборки.

Рис. 6. Фрагмент карты TerraNorte RLC (*a*), соответствующий ему фрагмент обучающей выборки высокого пространственного разрешения (б) и результат сегментации временной серии изображений Landsat (*в*) на часть территории Московской области. Чёрный цвет означает отсутствие пикселей обучающей выборки

В этом случае происходит исключение пикселей выборки, класс которых не соответствует классу результата классификации, полученного на основе этой выборки. На *рис. 6* приведён фрагмент карты RLC (*рис. 6a*), соответствующий ему результат сегментации сезонной временной серии изображений Landsat (*рис. 6в*) и скорректированная выборка высокого пространственного разрешения (*рис. 6б*).

Оценка точности распознавания используемой пашни

Для валидации и оценки точности полученных карт пахотных земель использовались опорные наборы данных, созданные в результате совместного анализа наземных и дистанционных данных высокого (10 м) и сверхвысокого (1-5 м) пространственного разрешения. Валидационные наборы представляли собой построенные по данным полевых обследований границы участков сельскохозяйственного назначения, которым был присвоен один из классов: используемый, неиспользуемый и частично используемый. Класс был присвоен на основе экспертной интерпретации временных серий спутниковых снимков высокого пространственного разрешения при наличии априорной информации об используемости участка в предшествующие годы. Частичная используемость означала обнаружение участков используемой пашни, доля площади которых в границах объекта составила значение в интервале от 33 до 66%. Опорные наборы были получены для полей Каширского района Московской области и Октябрьского района Приморского края и содержали информацию о сельскохозяйственном использовании соответствующих участков в 2016 г. для Московской области и 2015 г. для Приморского края. В целях более корректного сопоставления с бинарной картой пахотных земель по данным Landsat класс «частично используемые земли» был исключён из рассмотрения и, таким образом, валидационный набор был также бинаризован до классов «используемые земли» и «неиспользуемые земли». Результаты валидации на уровне пикселей Landsat приведены на рис. 7 (см. с. 122) и представлены в таблице (см. с. 123).

Общая точность карты пахотных земель по результатам валидации на Каширский район Московской области составила 88,75%. Аналогично для карты пахотных земель Октябрьского района Приморского края было получено значение общей точности 84,4%.

б

Рис. 7. Результат валидации карт используемых пахотных земель по данным Landsat (жёлтый) на территорию Приморского края (*a*) и Московской области (*б*). Верно распознанная используемая пашня обозначена светло-зелёным, верно распознанная неиспользуемая пашня — ярко-зелёным, ошибки «ложной тревоги» указаны красным, «пропуска цели» — фиолетовым

	Используемая пашня (назем.)	Неиспользуемые земли (назем.)	Используемая пашня (назем.)	Неиспользуемые земли (назем.)
Используемая пашня (класс.)	119 943	7240	327 111	2832
Неиспользуемые земли (класс.)	26 203	143 924	79 042	116 239
Пропуск цели	0,179		0,195	
Ложная тревога		0,048		0,024
Общая точность		0,888		0,844

Матрицы ошибок, метрики общей точности и ошибок первого и второго рода для результатов валидации карт на Каширский район Московской области (левая часть таблицы) и Октябрьский район Приморского края (правая часть таблицы)

Обсуждение и заключение

Сезонные карты используемой пашни были получены для Московской области и её окрестностей для 2016 г. и Приморского края и его окрестностей для 2015 г. Оценки общей точности указывают на достаточно высокую достоверность результатов. Заметен дисбаланс ошибок первого и второго рода в сторону ошибки пропуска цели (19,5% и 17,9% для Октябрьского и Каширского районов соответственно), при этом ошибки ложной тревоги существенно ниже (2,4 и 4,8% соответственно). Можно заключить, что полученные карты практически не содержат ошибочных включений из других классов, однако недостаточно полно описывают всю используемую пашню. Такого рода особенности могут быть связаны с некоторым несоответствием определений используемой пашни, принятых при создании эталонных наборов и при автоматическом распознавании. Тематическое расширение обучающей выборки с включением ряда подклассов используемых земель (например, участков многолетних трав) может быть одним из способов решения этой проблемы. Кроме этого, необходимо учитывать особенность создания эталонных наборов, предполагающую некоторую неопределённость присвоения бинаризованного класса всем пикселям внутри границ объектов, которая может достигать 33% их площади.

Помимо приведённых выше оценок общей точности классификации, интерес представляют значения метрики F-score для класса используемой пашни (Stehman, 1997). F-score является класс-ориентированной метрикой, т.е. может быть рассчитана отдельно для каждого класса, минимизируя влияние со стороны остальных классов. Значение метрики F-score для Октябрьского района составило 88,87%, что близко к значению 87,76% для Каширского района. Таким образом, при одинаковой статистической представленности классов пашня выявляется одинаково хорошо для двух удалённых регионов и различных вегетационных сезонов, что говорит в пользу устойчивости разработанных подходов.

Описанные в работе методы предварительной обработки спутниковых данных высокого пространственного разрешения, включающие фильтрацию мешающих факторов и восстановление временных серий, обеспечивают возможность расчёта информативных признаков для распознавания пахотных земель на ежегодной основе. Учитывая рекордную длительность непрерывных дистанционных наблюдений земной поверхности спутниковой системой Landsat, предложенные подходы могут быть положены в основу оценки многолетней динамики используемых пахотных земель с высоким пространственным разрешением.

Работа была выполнена в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164) с использованием ресурсов Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды (Лупян и др., 2015).

Литература

- 1. Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локальноадаптивной классификации // Компьютерная оптика. Самара: ИСОИ РАН, 2011. Т. 35. № 1. С. 103–116.
- 2. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.
- 3. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- 4. Иванов М.А., Прищепов А.В., Голосов В. Н., Залялиев Р.Р., Ефимов К.В., Кондратьева А.А., Киняшова А.Д., Ионова Ю.К. Методика картографирования динамики пахотных угодий в бассейнах рек Европейской территории России за период 1985–2015 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 161–171.
- 5. *Колбудаев П.А., Барталев С.А., Плотников Д. Е., Матвеев А. М.* Технология обработки спутниковых данных Landsat-TM/ETM+ // 14-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН. 2016. С. 37.
- 6. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 247–267.
- 7. *Люри Д. И., Горячкин С. В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т. Т.* Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
- 8. *Плотников Д. Е.* Метод сегментации временной серии спутниковых изображений // 12-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН, 2014. С. 375.
- 9. Плотников Д. Е., Барталев С. А., Лупян Е. А. Признаки распознавания пахотных земель на основе многолетних рядов данных спутникового спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 330–341.
- 10. Плотников Д. Е., Миклашевич Т. С., Барталев С.А. Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 103–110.
- 11. Плотников Д. Е., Колбудаев П.А., Барталев С.А. Автоматическое распознавание используемых пахотных земель на основе временных серий синтезированных ежедневных изображений Landsat на территорию Приморского края // 14-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН. 2016. С. 387.
- 12. Плотников Д. Е., Колбудаев П.А., Барталев С.А., Лупян Е.А. Распознавание используемых пахотных земель на основе сезонных временных серий восстановленных изображений Landsat на примере Московской области // 15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН. 2017. С. 382.
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A. A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. V. 5. No. 1. P. 55–64. DOI: 10.1080/2150704X.2013.870675.
- Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Loupian E.A. Mapping of arable land in Russia using multiyear time series of MODIS data and the LAGMA classification technique // Remote Sensing Letters. 2016. V. 7. No. 3. P. 269–278. DOI: 10.1080/2150704X.2015.1130874.
- 15. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. V. 45. Iss. 1. P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
- Chen J., Chen J., Liao A., Cao X., Chen L., Chen X., He C., Han G., Peng S., Lu M., Zhang W., Tong X., Mills J. Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. V. 103. P. 7–27. URL: https://doi.org/10.1016/j. isprsjprs.2014.09.002.

- Förster S., Kaden K., Förster M., Itzerott S. Crop type mapping using spectral-temporal profiles and phonological information // Computers and Electronics in Agriculture. 2012. V. 89. P. 30–40. URL: http://doi. org/10.1016/j.compag.2012.07.015.
- Hua L., Zhang X., Chen X., Yin K., Tang L. A feature-based approach of decision tree classification to map time series urban land use and land cover with Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI in a Coastal City, China. October 2017 // Intern. J. Geo-Information. 2017. V. 6. No. 11. P. 331. DOI: 10.3390/ijgi6110331.
- 19. *Maxwell S. K.*, *Craig M. E.* Use of Landsat ETM+ SLC-off segment-based gap-filled imagery for crop type mapping. Geocarto International. 2008. V. 23. No. 3. P. 169–179. DOI: 10.1080/10106040701207399.
- 20. *Richardson A. J.*, *Weigand C. L.* Distinguishing vegetation from soil background information // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 1977. V. 43. P. 1541–1552.
- Stehman S. V. Selecting and Interpreting Measures of Thematic Classification Accuracy // Remote Sensing of Environment. 1997. V. 62. P. 77–89. DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00083-7.
- 22. *Waldner F., Canto G.S., Defourny P.* Automated annual cropland mapping using knowledge-based temporal features // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. V. 110. P. 1–13. DOI: 10.1016/j. isprsjprs.2015.09.013.
- Xu Y., Yu L., Zhao Y., Feng D., Cheng Y., Cai X., Gong P. Monitoring cropland changes along the Nile River in Egypt over past three decades (1984–2015) using remote sensing // Intern. J. Remote Sensing. 2017. V. 38. P. 4459–4480. DOI: 10.1080/01431161.2017.1323285.
- 24. *Yan L., Roy D. P.* Conterminous United States crop field size quantification from multi-temporal Landsat data // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 172. P. 67–86. DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.034.
- 25. *Zhao X.*, *Wang X.*, *Cao G.*, *Chen K.*, *Tang W.*, *Zhang Z.* Crop identification by using seasonal parameters extracted from time series Landsat images in a mountainous agricultural county of Eastern Qinghai Province, China // J. Agricultural Science. 2017. V. 9. No. 4. P. 116–127. DOI: 10.5539/jas.v9n4p116.

Automated annual cropland mapping from reconstructed time series of Landsat data

D. E. Plotnikov, P.A. Kolbudaev, S.A. Bartalev, E.A. Loupian

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru

The paper is devoted to the method for annual cropland mapping over two distant regions of Russia with reconstructed seasonal time series of Landsat data. The method makes use of time-series-based spectro-temporal metrics extracted from time series of surface reflectance data in red, near infrared and short-wave infrared, as well as from vegetation indices. The new method aimed at time series reconstruction, which relies on seasonal phenology similarities within group of related objects, is proposed to meet requirements imposed on temporal density for cropland mapping. LAGMA mapping method and Random Forest classifier were used to account for diversity of cropping techniques and environmental conditions within Moscow region and Primorksy krai. Cropland map validation was based on in situ data and satellite imagery of very high spatial resolution and was performed for Kashirsky District (Moscow Region) and Oktyabrsky District (Primorsky Krai), where overall accuracy reached 88.7% and 84.4%, respectively.

Keywords: remote sensing, mcropland mapping, Landsat, time series reconstruction, spatio-temoral analysis

Accepted: 05.04.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-112-127

References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A., Raspoznavanie pakhotnykh zemel' na osnove mnogoletnikh sputnikovykh dannykh spektroradiometra MODIS i lokal'no-adaptivnoi klassifikatsii (Recognition of arable lands using multi-annual satellite data from spectroradiometer modis and locally adaptive supervised classification), *Komp'yuternaya optika*, Samara: ISOI RAN, 2011, Vol. 35, No. 1, pp. 103–116.

- 2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Sostoyanie i perspektivy razvitiya metodov sputnikovogo kartografirovaniya rastitel'nogo pokrova Rossii (Current state and development prospects of satellite mapping methods of Russia's vegetation cover), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 203–221.
- 3. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2017, 208 p.
- 4. Ivanov M.A., Prishchepov A.V., Golosov V.N., Zalyaliev R.R., Efimov K.V., Kondrat'eva A.A., Kinyashova A.D., Ionova Yu.K., Metodika kartografirovaniya dinamiki pakhotnykh ugodii v basseinakh rek Evropeiskoi territorii Rossii za period 1985–2015 gg. (Method of croplands dynamics mapping in river basins of the European part of Russia for the period of 1985–2015), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 161–171.
- Kolbudaev P.A., Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Matveev A.M., Tekhnologiya obrabotki sputnikovykh dannykh Landsat-TM/ETM+, XIV Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (XIV All-Russia Open Conference "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, IKI RAN, 2016, p. 37.
- 6. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskii A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 247–267.
- 7. Lyuri D. I., Goryachkin S. V., Karavaeva N.A., Denisenko E. A., Nefedova T. T., *Dinamika sel'skokho-zyaistvennykh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv*, Moscow: GEOS, 2010, 416 p.
- 8. Plotnikov D. E., Metod segmentatsii vremennoi serii sputnikovykh izobrazhenii, *XII Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*" (XIV All-Russia Open Conference "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, IKI RAN, 2014, p. 375.
- 9. Plotnikov D. E., Bartalev S. A., Loupian E. A., Priznaki raspoznavaniya pakhotnykh zemel' na osnove mnogoletnikh ryadov dannykh sputnikovogo spektroradiometra MODIS (The recognition features to map arable lands based on multi-annual MODIS Earth observation data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 1, pp. 330–341.
- Plotnikov D. E., Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Vosstanovlenie vremennykh ryadov dannykh distantsionnykh izmerenii metodom polinomial'noi approksimatsii v skol'zyashchem okne peremennogo razmera (Using local polynomial approximation within moving window for remote sensing data time-series smoothing and data gaps recovery), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 103–110.
- 11. Plotnikov D. E., Kolbudaev P.A., Bartalev S.A., Avtomaticheskoe raspoznavanie ispol'zuemykh pakhotnykh zemel' na osnove vremennykh serii sintezirovannykh ezhednevnykh izobrazhenii Landsat na territoriyu Primorskogo kraya, *XIV Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (XIV All-Russia Open Conference "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, IKI RAN, 2016, p. 387.
- Plotnikov D. E., Kolbudaev P.A., Bartalev S.A., Loupian E.A., Raspoznavanie ispol'zuemykh pakhotnykh zemel' na osnove sezonnykh vremennykh serii vosstanovlennykh izobrazhenii Landsat na primere Moskovskoi oblasti, XV Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (XV All-Russia Open Conference "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, IKI RAN, 2017, p. 382.
- 13. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A., A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data, *Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 5, No. 1, pp. 55–64, DOI: 10.1080/2150704X.2013.870675.
- 14. Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Loupian E.A., Mapping of arable land in Russia using multiyear time series of MODIS data and the LAGMA classification technique, *Remote Sensing Letters*, 2016, Vol. 7, No. 3, pp. 269–278, DOI: 10.1080/2150704X.2015.1130874.
- 15. Breiman L., Random Forests, *Machine Learning*, 2001, Vol. 45, Issue 1, DOI: 10.1023/A:1010933404324.

- Chen J., Chen J., Liao A., Cao X., Chen L., Chen X., He C., Han G., Peng S., Lu M., Zhang W., Tong X., Mills J., Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, Vol. 103, pp. 7–27, ISSN 0924-2716, https://doi.org/10.1016/j. isprsjprs.2014.09.002.
- 17. Förster S., Kaden K., Förster M., Itzerott S., Crop type mapping using spectral-temporal profiles and phonological information, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, Vol. 89, pp. 30–40, URL: http://doi. org/10.1016/j.compag.2012.07.015.
- Hua L., Zhang X., Chen X., Yin K., Tang L., A feature-based approach of decision tree classification to map time series urban land use and land cover with Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI in a Coastal City, China. October 2017, *International J. Geo-Information*, 2017, Vol. 6, No. 11, p. 331, DOI: 10.3390/ ijgi6110331.
- 19. Maxwell S. K., Craig M. E., Use of Landsat ETM+ SLC-off segment-based gap-filled imagery for crop type mapping, 2008, *Geocarto International*, Vol. 23, No. 3, pp. 169–179, DOI: 10.1080/10106040701207399.
- 20. Richardson A. J., Weigand C. L., Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1977, Vol. 43, pp. 1541–1552.
- 21. Stehman S. V., Selecting and Interpreting Measures of Thematic Classification Accuracy, *Remote Sensing of Environment*, 1997, Vol. 62, pp. 77–89, DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00083-7.
- 22. Waldner F., Canto G.S., Defourny P., Automated annual cropland mapping using knowledge-based temporal features, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, Vol. 110, pp. 1–13, DOI: 10.1016/j. isprsjprs.2015.09.013.
- Xu Y., Yu L., Zhao Y., Feng D., Cheng Y., Cai X., Gong P., Monitoring cropland changes along the Nile River in Egypt over past three decades (1984–2015) using remote sensing. *Intern. J. Remote Sensing*, 2017, Vol. 38, pp. 4459–4480, DOI: 10.1080/01431161.2017.1323285.
- 24. Yan L., Roy D. P., Conterminous United States crop field size quantification from multi-temporal Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 172, pp. 67–86, ISSN 0034-4257, DOI: 10.1016/j. rse.2015.10.034.
- Zhao X., Wang X., Cao G., Chen K., Tang W., Zhang Z., Crop identification by using seasonal parameters extracted from time series Landsat images in a mountainous agricultural county of Eastern Qinghai Province, China, *J. Agricultural Science*, 2017, Vol. 9, No. 4, pp. 116–127, ISSN 1916-9752, DOI: 10.5539/jas.v9n4p116.