

Метод детектирования летне-осенних всходов озимых культур по данным радиометра MODIS

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

*Институт космических исследований РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru*

Спутниковые данные MODIS в настоящее время широко используются в системе мониторинга сельскохозяйственных земель России. В статье рассмотрен метод детектирования посевов озимых культур на основе анализа временной динамики значений перпендикулярного вегетационного индекса PVI, получаемых с заданной временной частотой на основе очищенных от влияния снега и облачности композитных изображений MODIS. Детектирование озимых культур основано на использовании признака, отражающего факт непрерывного роста значений PVI на некотором временном интервале в летне-осенний период вегетации. С целью фильтрации ошибочно выделяемых участков естественной растительности со схожей динамикой PVI в указанный период в работе предложен обучаемый корреляционный алгоритм построения маски непахотных земель.

Введение

Устойчивый рост объемов и качества сельскохозяйственной продукции в настоящее время является одним из ключевых условий экономического развития Российской Федерации и важнейшим фактором обеспечения продовольственной безопасности в мире. Информационной основой государственного регулирования рынка продовольствия являются данные прогноза и оценки урожая, что, в свою очередь, требует получения объективных и своевременных сведений о площадях и состоянии посевов. Выращивание озимых культур, обеспечивающих в России производство наиболее качественного зерна в объеме 40-45% от общего урожая зерновых [1], является одной из важнейших составляющих сельскохозяйственного растениеводства. Площадь озимых в масштабах страны от года к году варьирует в диапазоне 10-15 млн. га, до 95% которых приходится на Южный и Приволжский федеральные округа, хотя ареал выращивания распространяется на центрально-европейские регионы России, южные территории Сибири и Дальнего Востока.

Значительный потенциал использования данных дистанционного зондирования со спутников для мониторинга сельскохозяйственных земель к настоящему времени продемонстрирован результатами ряда исследований [2-4]. При этом для детектирования и оценки площадей посевов озимых культур была показана принципиальная возможность использования данных радиометра MODIS со спутников Terra и Aqua [5, 6].

Разработанный ранее алгоритм [5] выявления посевов озимых на региональном уровне по данным MODIS основан на анализе временных рядов значений перпендикулярного вегетационного индекса PVI [7] и использовании фиксированных пороговых значений для интервалов времени, с высокой вероятностью соответствующих моментам сева и максимального развития культур в летне-осенний период вегетации. Несмотря на то, что предложенный подход обеспечивает принципиальную возможность детектирования посевов озимых, для него характерен ряд существенных недостатков. В частности, отсутствие в предложенном алгоритме механизмов адаптивной настройки пороговых значений не обеспечивает учет региональных и межгодовых вариаций развития посевов озимых, определяемых различиями видов культур, сроками сева, погодными, почвенными, агротехническими и некоторыми другими условиями. Следствием этого являются внутренне присущие данному методу ограничения по его использованию на больших территориях (например, для всей России), а так-

же по сопоставимости получаемых для различных регионов и в различные годы результатов оценки площадей посевов.

Предложенный в настоящей работе метод в значительной мере свободен от указанных ограничений, что обеспечивает возможность его использования для ежегодной оценки площадей озимых в масштабах страны на основе спутниковых данных MODIS.

Используемые данные

Разработанный метод детектирования озимых культур основан на использовании данных радиометра MODIS со спутника Terra, а именно, продуктов MOD09GQK, MOD09GHK, MODMGGAD, MOD09GST, свободно распространяемых Геологической службой США [8]. Используемые продукты содержат данные измерений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в красном (R_1 , 620-670 нм) и ближнем ИК (R_2 , 841-876 нм) спектральных каналах с пространственным разрешением 250 м, используемые собственно для детектирования посевов озимых и решения ряда других тематических задач сельскохозяйственного мониторинга. Кроме того, на этапе предварительной обработки спутниковых данных для фильтрации зашумленных под влиянием облачности и снежного покрова наблюдений используются измерения КСЯ в голубом (459-479 нм) и среднем ИК (1628-1652 нм) спектральных каналах с пространственным разрешением 500 м.

Сформированный в ИКИ РАН архив содержит ежедневные данные MODIS по всей территории России за период с 2002 года по настоящее время и пополняется актуальными спутниковыми данными в оперативном режиме [9]. Разработанная в ИКИ РАН методика предварительной обработки спутниковых данных [10] позволяет строить набор производных информационных продуктов для их дальнейшего тематического анализа. Методика включает в себя отделение пикселей, заведомо непригодных для использования в силу больших зенитных углов визирования, построение масок облачного и снежного покровов, а также теней от облаков, с последующим формированием для фиксированных интервалов времени композитных изображений, очищенных от влияния снега и облачности. Метод детектирования посевов озимых предусматривает использование временных рядов двух типов композитных изображений – четырехдневных и недельных, непрерывно формируемых на основе ежедневных наблюдений в течение каждых 4-х и 7-ми дней соответственно.

Методы детектирования посевов озимых по данным MODIS

Предложенный в данной работе метод детектирования посевов озимых культур по данным MODIS основан на анализе временной динамики значений индекса PVI в летне-осенний период вегетации и включает в себя ряд последовательных этапов, описанных ниже.

Построение временных рядов PVI

Вегетационный индекс PVI является одним из часто используемых показателей состояния растительного покрова [7], тесно коррелирующих с объемом зеленой биомассы, площадью листового индекса и концентрацией хлорофилла растительного покрова. К преимуществам PVI, по сравнению, например, с таким широко применяемым спектральным вегетационным индексом, как NDVI, можно отнести относительно высокий уровень независимости его значений от яркостных характеристик подстилающей почвы. Это имеет особое значение при мониторинге сельскохозяйственной растительности, на начальных стадиях развития которой вклад почвы в интегральную яркость элемента наблюдения является доминирующим.

Указанный индекс рассчитывается как расстояние от данной точки до линии почв в пространстве измерений КСЯ в красном и ближнем ИК диапазонах. Выражение для линии почв

$R_2 = 1.1R_1 + 0.05$ было получено путем линейной аппроксимации (при коэффициенте детерминации $R^2 = 0.9$, см. рис. 1) экспериментальных данных о значениях КСЯ открытой почвы в различных регионах России. Таким образом, PVI вычисляется как $PVI(R_1, R_2) = -0,74R_1 + 0,67R_2 - 0,034$.

Выявление посевов озимых

В основу алгоритма детектирования посевов озимых положен анализ временных рядов PVI, значения которых рассчитываются с использованием четырехдневных композитных изображений MODIS. При этом проводится оценка пропущенных в результате влияния облачности или снежного покрова значений PVI с помощью линейной интерполяции между ближайшими во времени данными незашумленными наблюдениями и последующим медианным сглаживанием восстановленных временных серий данных.

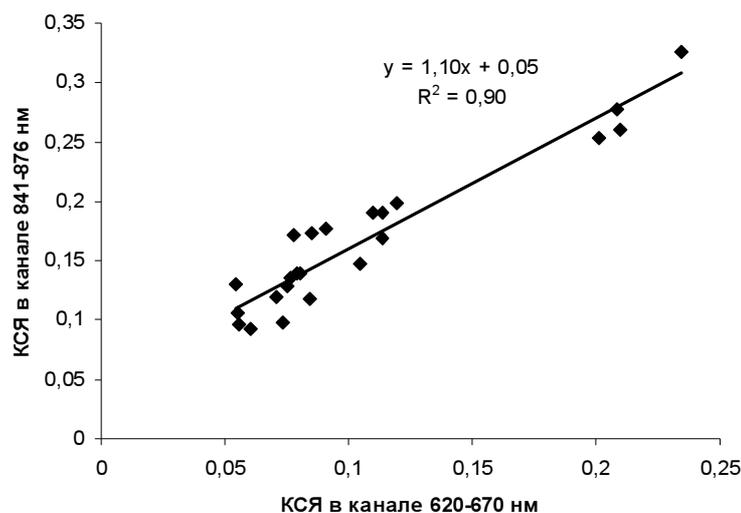


Рис. 1. Линия почв по данным измерений КСЯ в спектральных каналах MODIS

Одним из наиболее информативных признаков для выявления посевов озимых является характерный рост зеленой биомассы и, следовательно, значений PVI в конце года, тогда как для большинства других типов растительности свойственно снижение значений указанных параметров. Попиксельный анализ рядов PVI, предусмотренный предложенным методом, проводится только для наблюдений, лежащих во временном интервале, ограниченном слева двухсотым, а справа последним днем каждого календарного года. Последующий анализ рядов PVI можно представить в виде изложенной ниже совокупности шагов.

Внутри указанного выше временного интервала проводится поиск минимального и максимального значений PVI для текущего пикселя (точки I_{\min} и M_1 или M_2 на рис. 2), а соответствующие указанным экстремумам даты являются границами нового временного интервала, устанавливаемого независимо для каждого пикселя и внутри которого происходит дальнейший анализ. Пиксели, для которых максимум значений PVI наступил во времени раньше минимума, считаются не соответствующими посевам озимых и далее не рассматриваются (см. случай «в» на рис. 2).

При анализе участков, прошедших предыдущий этап обработки, предполагается, что исследуемый пиксель соответствует полю, засеянному озимыми, если ряд значений PVI демонстрирует на заданном временном интервале непрерывный рост для трех или большего числа последовательных наблюдений (см. рис. 3).

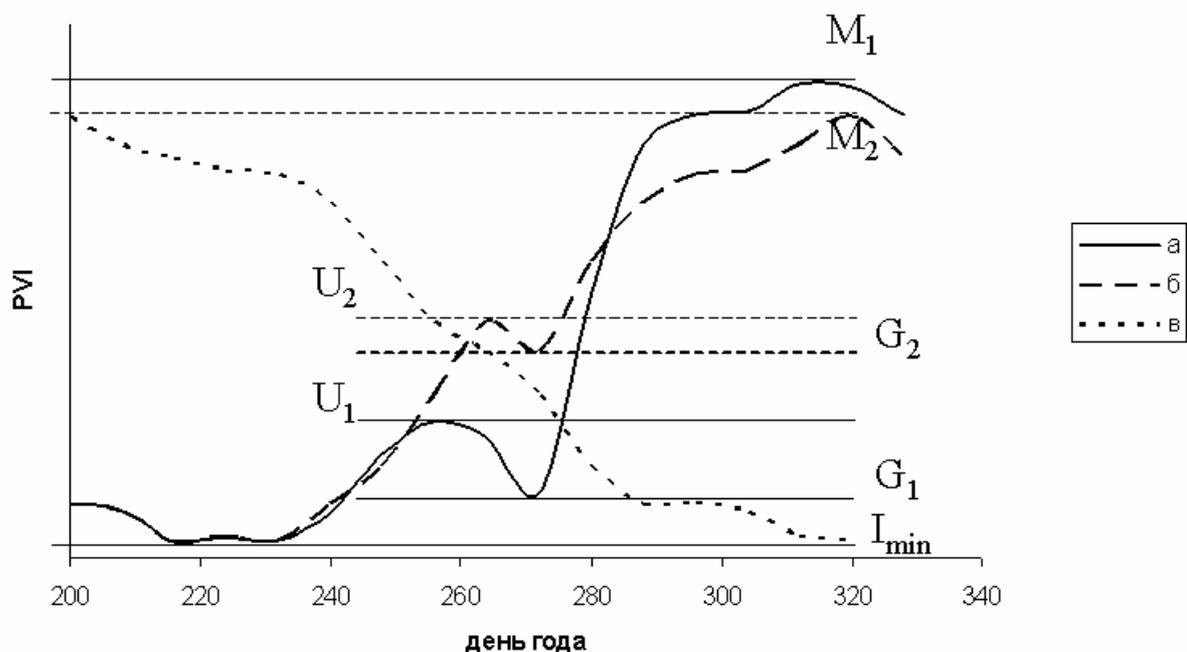


Рис. 2. Схематичное представление анализируемых при выявлении посевов озимых вариантов поведения временных рядов PVI

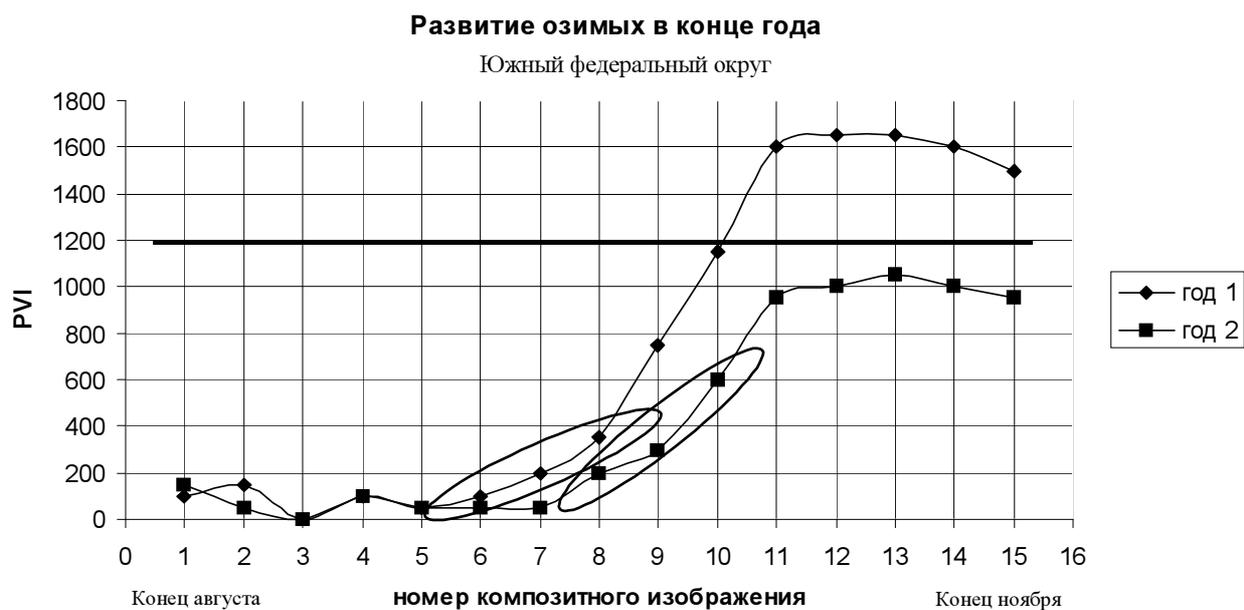


Рис. 3. Примеры рядов PVI, соответствующие посевам озимых двух последовательных лет. Эллипсами указаны участки роста PVI, используемые в качестве критерия для отнесения пиксела к классу озимых. Утолщенной горизонтальной линией отмечено гипотетическое значение порога при использовании порогового алгоритма. Значения индекса PVI нормированы на 10000

Учет возможных локальных снижений значений PVI, которые могут быть связаны с остаточным влиянием облачности, аппаратными шумами или другими мешающими факторами, требует использования при анализе временных рядов дополнительных критериев. В этой связи в данной работе под «непрерывным ростом» понимается такое поведение временного ряда PVI, когда глубина возможных локальных спадов (точки G_1 и G_2 на рис. 2) не превышает половину достигну-

той величины роста (точки U_1 и U_2 на рис. 2), т.е. если $U_2 - G_2 < G_2 - I_{\min}$ (случай «б» на рис. 2). В этом случае накопление числа точек непрерывного роста продолжается. Если же глубина спада превышает половину накопленного значения, т.е. $U_1 - G_1 > G_1 - I_{\min}$ (случай «а» на рис. 2), то дата наступления локального минимума (значение G_1 на рис. 2) считается новой границей рассматриваемого временного интервала и процедура анализа временного ряда и накопление точек роста происходит сначала в новых временных границах.

Фильтрация ошибок детектирования.

Использование изложенного выше подхода в ряде регионов сопровождается ошибочным включением участков естественной растительности некоторых типов в результаты детектирования посевов озимых, что потребовало разработки соответствующего алгоритма фильтрации.

В частности, естественная растительность засушливых степных регионов, часто обладающая в летне-осенний период динамикой развития сходной с посевами озимых, является одним из наиболее значимых факторов их ошибочного детектирования, что в наибольшей степени проявляется на территории Южного и Поволжского федерального округов. Сходство динамики развития посевов озимых и естественной растительности сухих степей объясняется наличием в данный период достаточного объема почвенной влаги, сезонная динамика которого главным образом определяется режимом выпадения атмосферных осадков. Локальный и нерегулярный характер выпадения атмосферных осадков и, следовательно, сезонной и межгодовой динамики развития степной растительности порождает существенные сложности ее выделения по спутниковым данным, в том числе и при анализе их многолетних рядов.

Примеры поведения многолетних временных рядов PVI для участков естественной растительности и для сельскохозяйственных территорий на одной и той же местности представлены на рис 4.

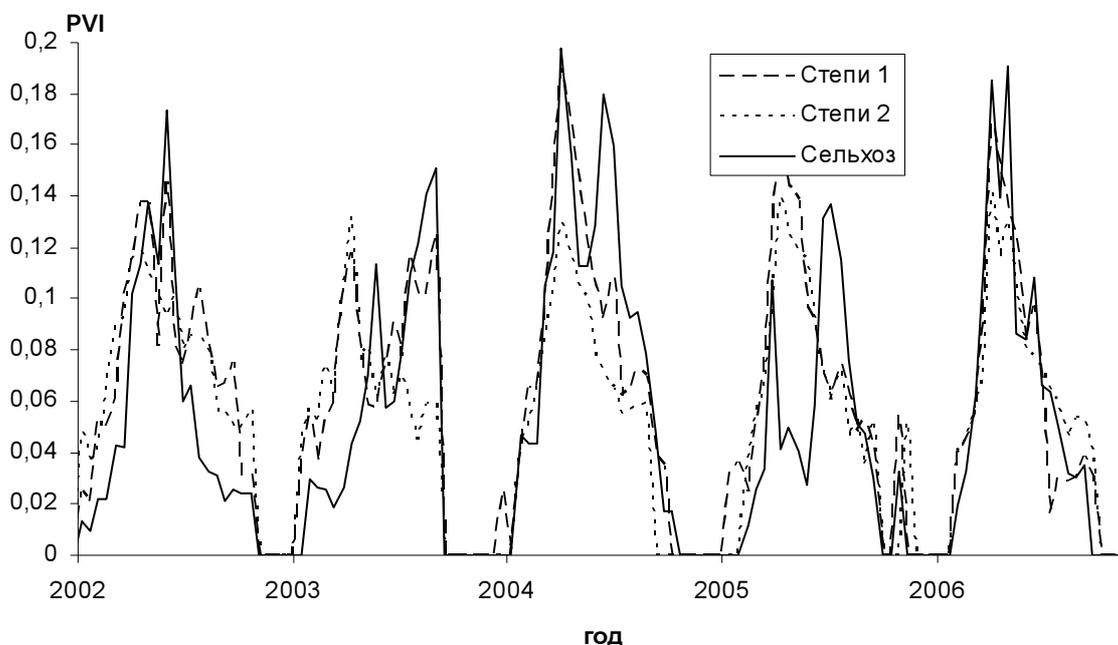


Рис. 4. Примеры многолетних временных рядов PVI для участков естественной растительности (пунктирные линии) и сельскохозяйственных угодий (сплошные линии)

Указанная особенность потребовала разработки специального алгоритма выявления по спутниковым данным естественной растительности, в основу которого положена гипотеза наличия на участках последней локальных пространственно-временных корреляций, вызванных сходной динамикой выпадения атмосферных осадков, как основного фактора, определяющего развитие растений в засушливых регионах.

В качестве входных данных для работы алгоритма используются многолетние данные MODIS в виде недельных композитных изображений. Кроме того, использование указанного алгоритма требует предварительного задания координат обучающего пикселя, то есть пикселя, заведомо соответствующего участку естественной растительности. Выбор обучающего участка может проводиться с использованием любой доступной информации, в том числе на основе визуального анализа спутниковых данных высокого пространственного разрешения. В качестве критерия для выявления естественной растительности используется значение коэффициента линейной корреляции K_{xy} между рядами значений PVI, соответствующих обучающему пикселю x_i (точка А на рис. 5) и анализируемому пикселю y_i (точка B_1 на рис. 5), находящемуся внутри окружности с центром в обучающем пикселе и радиусом r . При этом радиус r определяется исходя из характерных размеров участков, которые могут рассматриваться как локально однородные по метеорологическим условиям. В частности, в выполненных в данной работе экспериментах значение радиуса было задано $r = 50$ км.

При этом пиксели с высоким значением корреляции K (например, точки B_1, B_2, B_3 на рис.5) должны соответствовать естественной растительности, так как они имеют схожую с обучающим пикселем многолетнюю динамику развития и являются, в свою очередь, потенциальными обу-

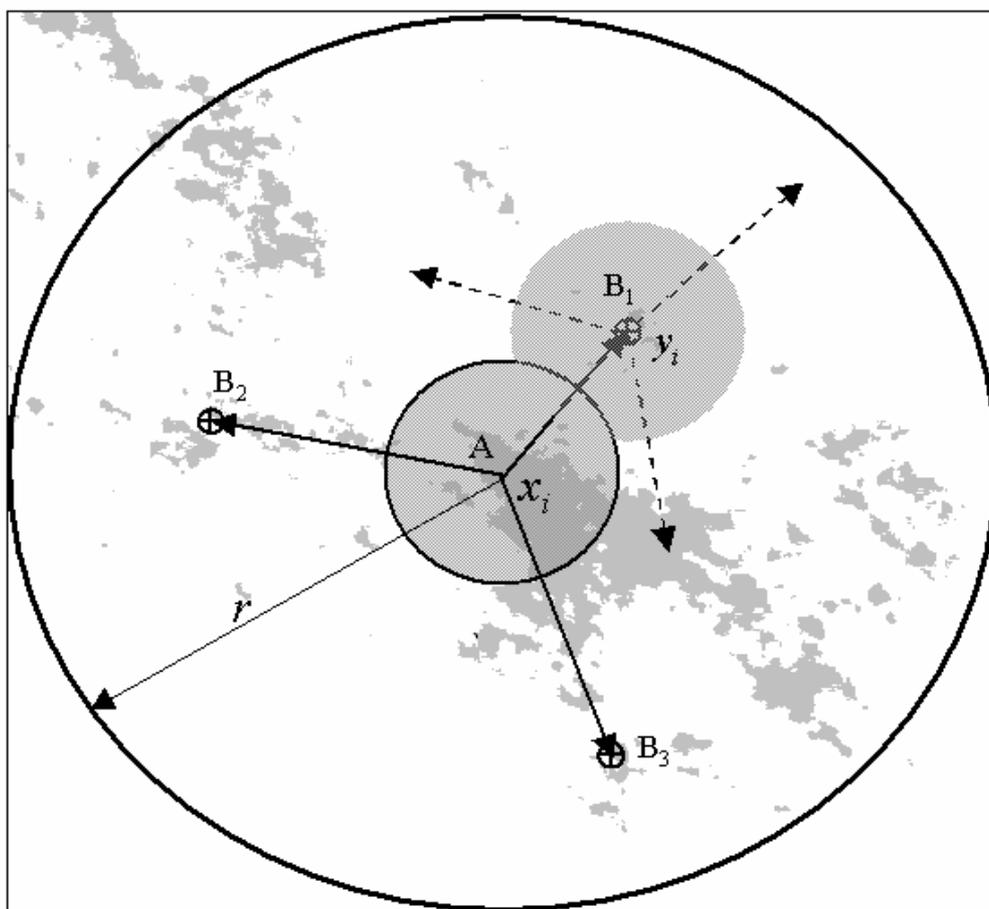


Рис. 5. Иллюстрация работы пространственно-временного корреляционного алгоритма выявления естественной растительности

чающими пикселями для следующего шага работы алгоритма. На каждом шаге выбираются новые обучающие пиксели, а пиксели с высокими значениями корреляции K по отношению к центральному пикселю добавляются в общую маску естественной растительности. При этом для равномерного покрытия анализируемой территории поиск новых обучающих точек среди отобранных пикселей происходит на различных направлениях от центральной точки, а точки, лежащие вблизи центральной (в работе размер данной окрестности равен 15 км) не могут выступать в качестве обучающих (закрашенные окружности на рис 5.). Кроме этого, новый обучающий пиксель должен удовлетворять ряду требований. Так, он должен принадлежать связанной группе пикселей, превышающей заданный размер (в качестве минимального размера группы принята величина 50 пикселей) и не должен быть краевым, т.е. должен быть полностью окружен пикселями данной группы. Алгоритм реализован так, что на каждом шаге по умолчанию ищутся три новых обучающих точки, а если это невозможно, то их количество снижается до двух, а затем до одной. При отсутствии точек, удовлетворяющих заданным требованиям, построение маски в текущем направлении заканчивается.

Необходимо отметить, что в результирующую маску естественной растительности не попадают пиксели сельскохозяйственных угодий ввиду того, что многолетняя временная динамика их развития в значительной мере определяется особенностями севооборота. Это является актуальным ввиду того, что маска создается для территорий, интенсивно используемых в сельском хозяйстве (в частности, Ростовской, Ставропольской, Волгоградской, Астраханской областей и Краснодарского края), и возделываемые поля могут находиться в окружении степной растительности.

Полученная маска степной растительности (рис. 6) была успешно использована для фильтрации основной части ложно детектируемых участков озимых в Южном и Приволжском федеральных округах. Ввиду того, что алгоритм основан на особенностях пространственно-временной динамики растительности, он может быть также использован для выделения других типов растительности. В частности, оказалось, что алгоритм успешно выделяет лесную и кустарниковую растительность, растительность в поймах рек и даже населенные пункты.

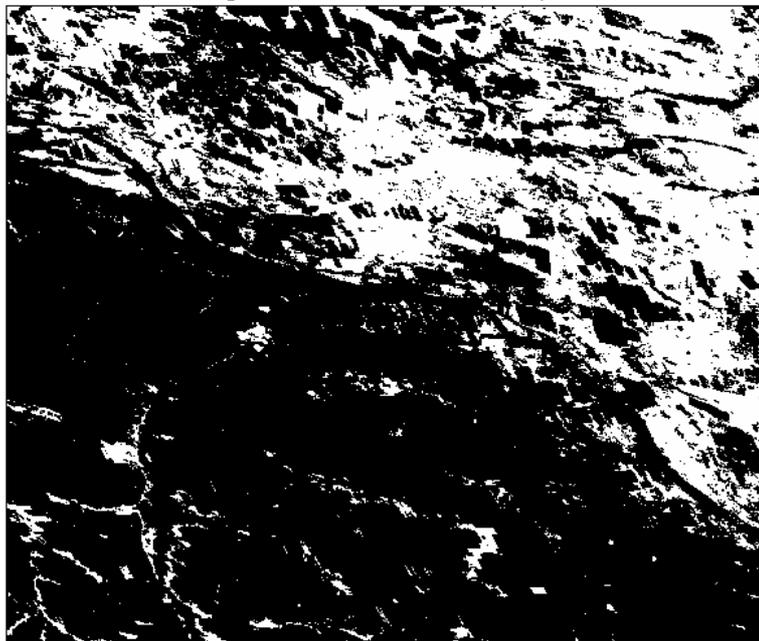


Рис. 6. Фрагмент маски непахотных земель. Белым указаны пиксели, соответствующие засушливой растительности

Полученные в результате маски разных типов растительности объединяются в маску заведомо непахотных земель, используемую для фильтрации пикселей, ошибочно детектируемых как озимые в различных регионах России.

Анализ результатов

Новый алгоритм детектирования озимых, основанный на характерном их развитии в летне-осенний период, позволил повысить точность и достоверность выделения посевов в различных регионах страны по сравнению с ранее разработанным в ИКИ РАН пороговым методом.

Сравнительный анализ полученных различными методами результатов может быть проведен с использованием данных, представленных в таблице 1 и на рис. 7.

С точки зрения использования дистанционного зондирования для сельскохозяйственного мониторинга южные регионы РФ существенно отличаются от северных. Указанные различия главным образом связаны с размерами и формой полей, и, как следствие, с различным уровнем влияния пограничных пикселей на результат обработки спутниковых данных. Кроме того, необходимо принимать во внимание существенные различия по количеству безоблачных наблюдений и продолжительности бесснежного периода.

Таблица 1. Сравнение результатов выявления посевов озимых различными методами по данным радиометра MODIS

Посевы озимых в 2004 г., тыс. га.				
Код на диаграмме	Субъект	Росстат	Новый алгоритм	Пороговый алгоритм
1	Краснодарский край	1089,6	821,0	639,2
2	Воронежская область	486,7	648,2	375,1
3	Белгородская область	284,7	334,8	85,3
4	Курская область	285,5	209,4	96,2
5	Орловская область	294,8	151,4	81,3
6	Липецкая область	167,1	272,1	78,5
7	Тамбовская область	298,8	264,5	97,5
8	Пензенская область	363,6	295,1	60,9
9	Рязанская область	229,6	224,7	25,7
10	Тульская область	167,1	94,8	12,2
11	Нижегородская область	192,2	151,4	0,0
12	Владимирская область	23,3	22,9	0,0
13	Республика Мордовия	169,8	90,2	1,4

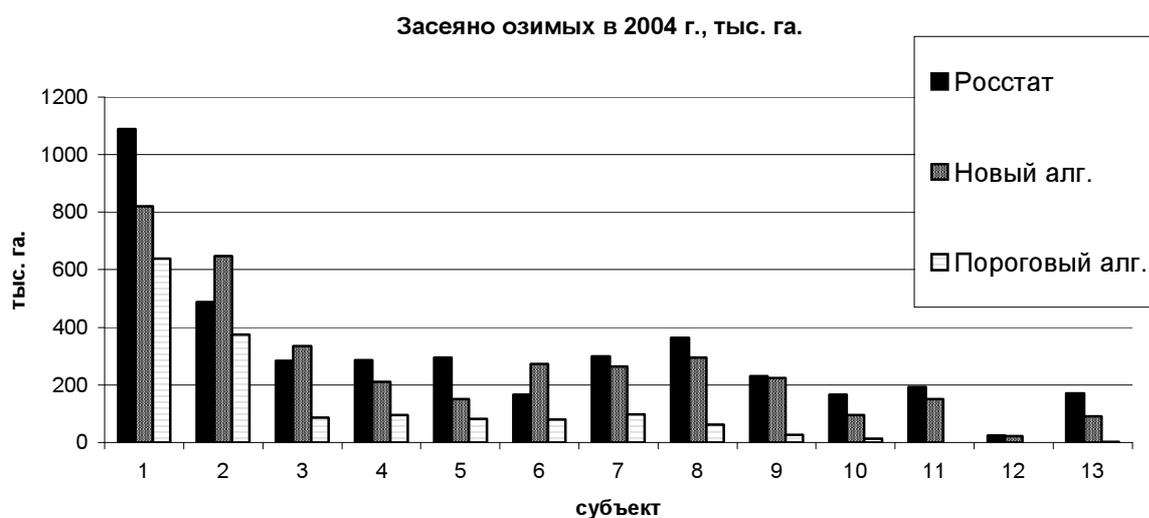


Рис. 7. Сравнение результатов выявления посевов озимых различными методами по данным радиометра MODIS

Вместе с тем из анализа полученных данных видно, что предложенный в работе алгоритм обеспечивает существенно более устойчивое выявление озимых по различным регионам, в то время как пороговый метод демонстрирует в более северных регионах крайне низкую точность. В ряде случаев новый алгоритм демонстрирует завышенные по сравнению с официальной статистикой значения, что можно объяснить осенним развитием на сельскохозяйственных полях растительности, не имеющей отношения к озимым (например, сорняки и многолетние травы). Исключение участков такой растительности из результатов детектирования посевов озимых на основе анализа временных рядов спутниковых данных является одной из задач дальнейшего развития предложенного метода.

Литература

1. Стенограмма пресс-конференции Министра сельского хозяйства РФ в агентстве "Интерфакс" 28.05.2008. (<http://www.mcx.ru>)
2. *Вандышева Н.М.* Мониторинг сельскохозяйственных земель на базе разномасштабных спутниковых данных // Исследование Земли из космоса, 2003. № 3. С. 72-84.
3. *Муратова Н.Р., Султангазин У.М., Терехов А.Г.* Контроль севооборота пахотных земель северного Казахстана по данным TERRA/MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: GRANP polygraph, 2005. Т. 2. С. 302-307.
4. *Барталев С.А., Лулян Е.А., Нейштадт И.А.* Метод выявления используемых пахотных земель по данным дистанционного зондирования со спутников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2006. Т. 2. С. 271-280.
5. *Барталев С.А., Лулян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю.* Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исследование Земли из космоса, 2006. № 3. С. 68-75.
6. *Лялько В.И., Сахацький О.И., Жолобак Г.М., Греков Л.Д.* Контроль площадей и состояния озимых культур с помощью снимков MODIS/TERRA и SPOT XI (на примере Киевской области) // Reports of the national Academy of Sciences of Ukraine, 2007 г., №3, стр. 122 – 127 .
7. *Чимитдоржиев Т.Н., Ефременко В.В.* Об использовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем // Исследование Земли из космоса, 1998. №3. С. 49 –55.
8. *Justice C.O.* An overview of MODIS Land data processing and product status // Remote Sensing of Environment, 2002. № 83. P. 3-15.
9. *Бурцев М.А., Мазуров А.А., Нейштадт И.А., Прошин А.А.* Построение архива спутниковых данных для анализа динамики растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2006. Т. 1. С. 170-174.
10. *Егоров В.А., Барталев С.А.* Построение временных серий улучшенных композитных изображений по данным MODIS для мониторинга растительности // Сб. тезисов Четвертой всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 2006 (на диске)