

Экспериментальная оценка распознаваемости агрокультур по данным сезонных спутниковых измерений спектральной яркости

Д.Е. Плотников¹, С.А. Барталев¹, В.О. Жарко¹, В.В. Михайлов², О.И. Просянникова²

¹ Институт космических исследований Российской академии наук
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

² ФГУ Центр агрохимической службы «Кемеровский»
650510, Кемеровская область, п. Новостройка, ул. Центральная 15
E-mail: agrohim_42@mail.ru

Приводятся результаты исследований по оценке возможностей распознавания сельскохозяйственных культур на основе временных рядов измерений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности спектрорадиометром MODIS со спутника Terra. Выполнен сравнительный анализ разделимости культур на основе их фазовых портретов в двумерном пространстве коэффициентов спектральной яркости в красном и ближнем ИК диапазонах длин волн и с использованием временных рядов перпендикулярного вегетационного индекса. Получены оценки вероятности правильного распознавания агрокультур в зависимости от продолжительности регулярных спутниковых наблюдений с начала вегетационного сезона.

Ключевые слова: дистанционные зондирование, спектрально-отражательные характеристики, временные ряды спутниковых данных, распознавание агрокультур

Введение

Задача дистанционного распознавания культур и оценки площадей посевов относится к приоритетным направлениям спутникового мониторинга сельского хозяйства. Решение этой задачи необходимо, в частности, для объективного контроля сельскохозяйственной отчетности, оценки состояния посевов и прогноза урожая, как ключевых функций систем дистанционного агромониторинга [1, 2].

Как правило, для дистанционного распознавания агрокультур используются данные разновременных спутниковых наблюдений в оптическом диапазоне спектра [3-5] или комбинированные данные оптических и микроволновых измерений [7]. Эффективность использования разновременных спутниковых данных для распознавания культур обусловлена различиями сезонной динамики их спектрально-отражательных характеристик, связанной с изменениями биофизических, морфологических, структурных и других характеристик посевов вследствие видовых особенностей фенологического развития, метеорологических и почвенных условий, применяемой агротехники [6, 8, 9]. Сезонные и многолетние временные серии спутниковых данных применяются для распознавания культурной растительности на основе динамики спектральных индикаторов [5,12].

Разнообразие культур, с учетом географической и временной изменчивости их характеристик, обуславливает необходимость использования для распознавания посевов на больших территориях временных рядов данных, квазинепрерывных в течение вегетационного сезона спутниковых измерений. Это, в свою очередь, приводит к необходимости применения для решения этой задачи данных спутниковых систем, обеспечивающих высокую периодичность наблюдений при одновременном охвате больших территорий, таких как, Terra/Aqua-MODIS [3-5] и Envisat-MERIS [10]. При этом алгоритмы распознавания агрокультур, как правило,

основаны на использовании временных рядов вегетационных индексов (ВИ), полученных по данным измерений отраженного излучения в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах.

В общем случае можно предположить, что в сравнении с использованием вегетационных индексов распознавание агрокультур на основе временных рядов собственно измерений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) потенциально способно обеспечить не меньшую, а возможно и более высокую достоверность и тематическую детальность классификации за счет повышения размерности пространства независимых признаков. В двухмерном пространстве значений КСЯ различных (как правило, красного и ближнего ИК) диапазонов длин волн временная динамика спектрально-отражательных характеристик агрокультур может быть описана в виде их, так называемых, фазовых портретов. Сравнительная оценка точности распознавания агрокультур на основе двух упомянутых выше подходов к спектрально-временному описанию их сезонной динамики, а именно фазовых портретов и временных рядов вегетационных индексов, является одной из основных задач данного исследования. При этом необходимо учитывать, что меньшая, как правило, подверженность значений вегетационных индексов случайным вариациям из-за изменений прозрачности атмосферы и геометрических условий освещения и наблюдения, является одним из факторов, способствующих снижению уровня ошибок дистанционного распознавания агрокультур.

К числу практически важных вопросов оперативного мониторинга агрокультур относится также влияние на точность распознавания таких параметров, как продолжительность периода непрерывных наблюдений с начала вегетационного сезона и длина временного интервала между последовательными измерениями отражательных характеристик поверхности. Из общих соображений очевидно, что при обеспечении уменьшения вычислительных затрат, повышение временного интервала может приводить к снижению точности распознавания культур. Одновременно, также из общих соображений, можно ожидать повышения точности распознавания по мере увеличения продолжительности периода спутниковых наблюдений с начала вегетационного сезона. Очевидно, что при оперативном мониторинге, в том числе с целью прогноза урожайности, важно обеспечить распознавания культур на возможно более ранних этапах их развития.

Представленные в статье результаты исследований позволяют оценить зависимость точности дистанционного распознавания культур от выше указанных факторов.

Тестовый участок и экспериментальные данные

Проведенные эксперименты основаны на использовании ежедневных данных наблюдений земной поверхности спектrorадиометром MODIS со спутника Terra, а именно стандартных продуктов данных MOD09 (<http://lpdaac.usgs.gov/main.asp>). Разработанная в ИКИ РАН технология [11] позволяет на основе продуктов MOD09 создавать синтезированные за фиксированные промежутки времени композитные изображения, свободные от влияния снега, облачности и измерений, непригодных для использования ввиду больших зенитных углов съёмки. Сформированные временные ряды четырехдневных (т.е. по данным наблюдений в течение 4-х последовательных дней) композитных изображений содержат значения КСЯ в красном (620-670 нм) и ближнем ИК (841-876 нм) диапазонах с пространственным разрешением 250 метров.

При создании композитных изображений пиксели присваивается значение КСЯ, наиболее близкое к среднему в течение соответствующего интервала времени и соответствующее свободной от влияния облачного и снежного покровов поверхности. При этом вре-

менная серия композитных изображений для любого элемента изображения может содержать пропуски, связанные с отсутствием наблюдений открытой поверхности в течение соответствующего интервала. Как правило, количество пропусков относительно невелико летом и возрастает в весенний и осенний периоды. Кроме этого, в композитные изображения часто включаются существенно различающиеся по геометрическим условиям наблюдений данные. Это приводит к тому, что наряду с изменением накопленной фитомассы временные ряды ВИ отражают и вариабельность условий съёмки, а также содержат пропуски. Для исключения ошибочных данных и заполнения пропусков в работе использован алгоритм аппроксимации полиномом второй степени внутри скользящего окна переменного размера, длина которого выбирается так, чтобы оно включало некоторое заданное число значащих наблюдений открытой земной поверхности. Поиск коэффициентов полинома выполняется методом наименьших квадратов с решением задачи минимизации методом деформируемого многогранника. Последний не использует значения градиентов функции и пригоден для негладких функций, выгодно отличаясь быстродействием и надежностью. Будучи относительно простой функцией, полином второй степени тем ни менее позволяет аппроксимировать сезонную динамику спектрально-отражательных характеристик растительности, и, в частности, обеспечивает достаточно корректное описание фенологических экстремумов.

В качестве тестового участка для проведения экспериментов был выбран расположенный в лесостепной зоне Западной Сибири Ленинск-Кузнецкий район Кемеровской области с общей площадью пахотных земель около 130 тыс. га, при средней площади полей около 60 га.

Обучающая выборка для распознавания культур методом контролируемой классификации была сформирована по данным наземного обследования тестового участка специалистами Центра агрохимической службы «Кемеровский». Наземное обследование выполнялось в 2009 году и включало в себя, в частности, сбор данных о видах агрокультур в границах полей, предварительно построенных с использованием спутниковых изображений Landsat-TM/ETM+.

Для проведения экспериментов векторные данные о границах полей были трансформированы в растровый формат с величиной разрешения изображений MODIS и последующим исключением смешанных пикселов, то есть пикселов включающих в себя более одного тематического класса. Принадлежащие к одному классу пиксели опорной выборки были сгруппированы в объекты, соответствующие отдельным полям, на уровне которых проводилась дальнейшая коррекция выборки. Для каждого i -го класса и j -го признака (т.е. значения КСЯ в момент времени $t=j$) было рассчитано среднее E_i^j и стандартное отклонение σ_i^j значений признака с использованием всех принадлежащих классу пикселей. Далее, для каждого объекта, принадлежащего i -му классу, было рассчитано среднее значение j -го признака M_i^j . В качестве критерия исключения объекта класса i из опорной выборки использовалось выражение $|M_i^j - E_i^j| > 2\sigma_i^j$, для $\forall j$.

Методика и результаты экспериментов

В процессе экспериментов исследовалась точность распознавания агрокультур в зависимости от используемого набора признаков, при условии неизменности опорной выборки и метода распознавания. В качестве последнего использовалась классификация методом максимального правдоподобия в составе программного пакета ERDAS Imagine. Общая схема экспериментов представлена на рис. 1.

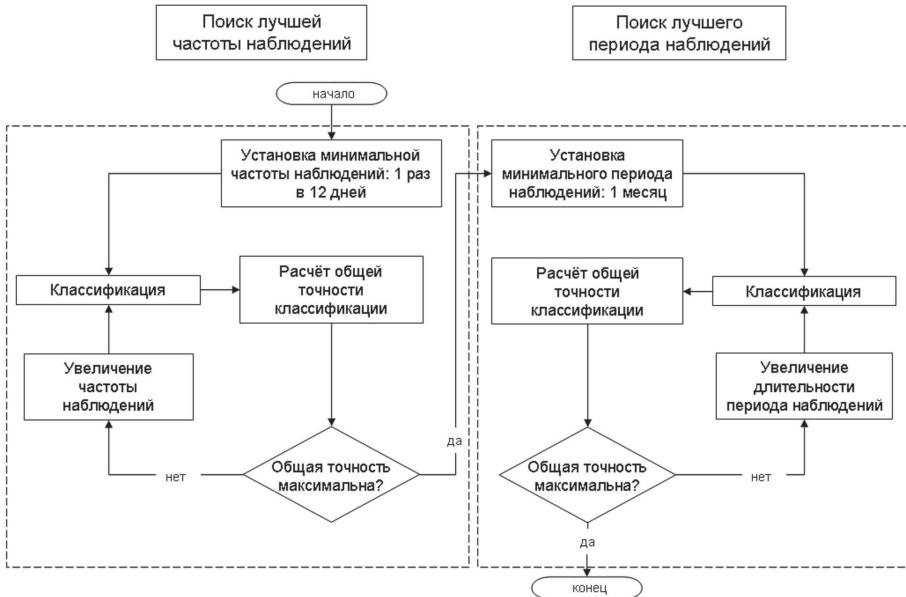


Рис. 1. Логическая схема выбора наилучшего набора признаков распознавания

На начальном этапе была проведена серия экспериментов по классификации агрокультур на основе сезонных рядов вегетационного индекса. При решении задач распознавания культур необходимо учитывать влияние яркости почвы на значения КСЯ, особенно сильно проявляющееся для редкой растительности. Это влияние может быть снижено за счет использования почвенно-адаптивных вегетационных индексов, и, в частности, перпендикулярного вегетационного индекса PVI, который в значительной мере независим от яркости почв и тесно коррелирует с объемом зеленой биомассы растений. Согласно [5] PVI вычисляется по формуле $PVI(R_1, R_2) = -0,74R_1 + 0,67R_2 - 0,034$, где R_1 и R_2 соответствуют измерениям КСЯ в красном и ближнем ИК каналах.

Результаты оценки разделимости агрокультур в пространстве разновременных значений PVI, используемых как множество независимых признаков распознавания, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Разделимость агрокультур в пространстве разновременных значений PVI по величине евклидова расстояния. Цвет характеризует величину расстояния

Класс	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
горох	1		2706	2750	3857	3036	1430	1053	4154	1208	1199	2106	1619
донник	2			2972	1941	1560	2509	1971	3244	2221	2821	854	1702
картофель	3				3685	2707	1540	2122	1869	2014	2316	2526	2085
люцерна	4					1160	3409	3062	3753	3530	3509	2358	3170
многол. травы	5						2362	2937	2562	2661	2661	1614	2257
овес	6							808	2917	844	1111	1869	1231
однол. травы	7								3292	692	1143	1334	902
пар	8									3142	3841	3033	2899
пшеница	9									1432	1573	622	
рапс	10										2338	1830	
ржь озимая	11											1137	
ячмень	12												

Анализ таблицы указывает на наличие группы классов с небольшим межклассовым расстоянием и, следовательно, слабой взаимной разделимостью. Сезонные профили PVI данной группы классов приведены на рис. 2.

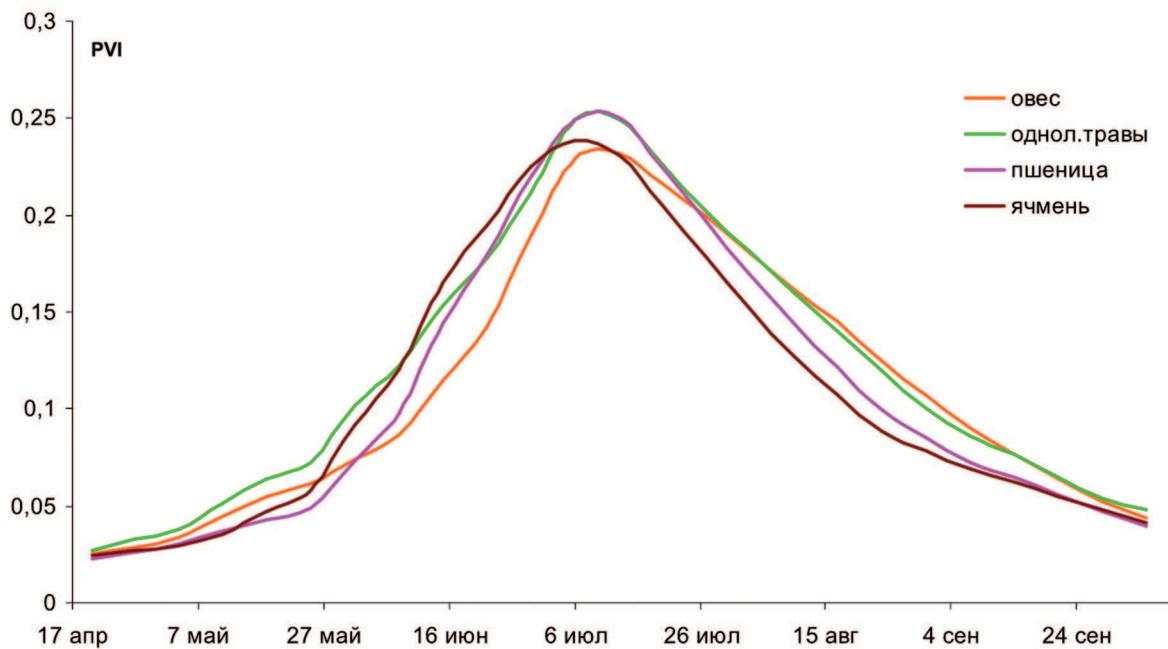


Рис. 2. Сезонная динамика PVI для классов яровых культур (красный цвет в таблице 1)

Ввиду схожести значений временных рядов PVI указанные культуры были объединены в условный класс «яровые». Сезонная динамика средних значений PVI данного класса, а также других рассматриваемых агрокультур представлена на рисунке 3.

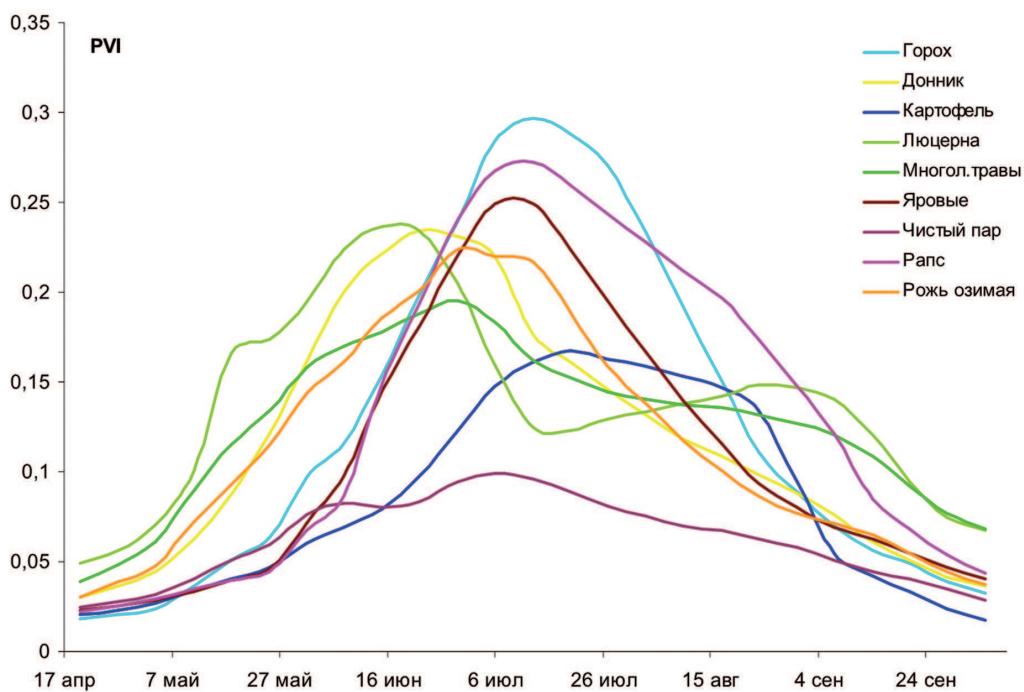


Рис. 3. Сезонная динамика средних значений PVI различных классов агрокультур

Сравнение результатов распознавания классов агрокультур с данными наземного обследования приведено в таблице 2. Общая точность классификации агрокультур (с учетом факта объединения ряда культур в класс «яровые») составила 94,4%.

Таблица 2. Матрица перепутывания классов в пространстве сезонных значений PVI

Распознавание по спутниковым данным		Данные наземного обследования									% пропусков
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Горох	1	58	0	0	0	0	11	0	0	0	15,9
Донник	2	0	127	0	0	3	34	0	0	3	24,4
Картофель	3	0	0	101	0	0	10	7	1	0	15,1
Люцерна	4	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0,0
Многол. травы	5	0	0	1	1	797	116	17	8	1	15,3
Группа яровых	6	2	3	3	0	2	5822	9	6	4	0,6
Чистый пар	7	0	1	7	0	2	49	574	4	0	9,9
Рапс	8	0	0	0	0	0	127	0	175	1	42,2
Рожь озимая	9	0	0	0	0	0	14	7	0	72	22,6
% ошибочных включений		3,3	3,1	9,8	3,7	0,9	6,5	6,5	9,8	11,1	94,4

С точки зрения классификации использование PVI приводит к уменьшению размерности пространства признаков в сравнении с использованием значений КСЯ в красном и ближнем ИК диапазонах, что сокращает затраты вычислительных ресурсов на классификацию. С другой стороны при расчёте ВИ может происходить некоторая потеря спектральной информации, учёт которой может улучшить результаты распознавания. В связи с этим была проведена серия экспериментов для оценки эффективности использования сезонных рядов КСЯ для классификации культур.

Анализ фазовых портретов яровых культур (рис. 4) в пространстве значений КСЯ красного и ближнего ИК диапазонов позволяет сделать вывод о наличии принципиальной возможности их разделения, особенно после прохождения точки фазового разворота (соответствующей максимальному сезонному значению PVI).

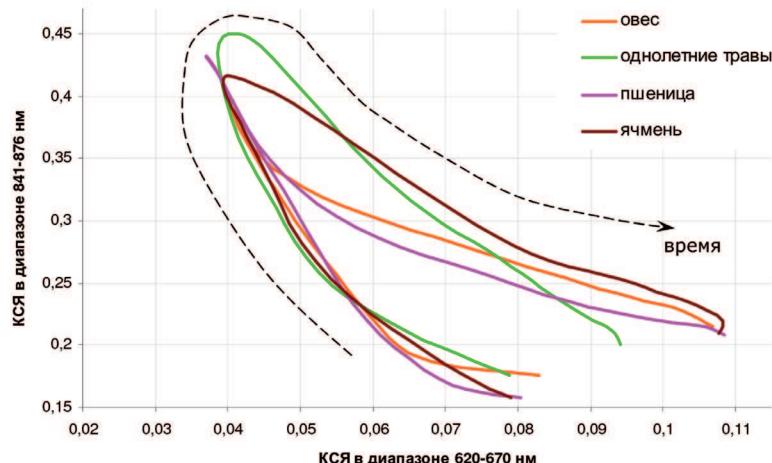


Рис. 4. Фазовые портреты яровых культур в двумерном пространстве значений КСЯ

Фазовые портреты остальных классов также демонстрируют их хорошую разделимость с использованием значений КСЯ по данным MODIS.

На рисунках 3 и 4 можно видеть, что величины межклассовых расстояний существенно варьируют в зависимости от времени наблюдения. Для минимизации времени вычислений на классификацию, актуальным является уменьшение количества признаков с сохранением общих особенностей динамики развития культур, которое можно достичь путём увеличения временных интервалов между ними в кратное количество раз. Кроме этого, важным с практической точки зрения для решения задачи оперативного выявления культур является определение наиболее раннего момента времени, когда каждый из классов может

быть достоверно отделён от остальных. Для определения искомых параметров проведена описанная ниже серия экспериментов.

Экспериментальный набор данных за период вегетации, представленный рядом КСЯ с временным шагом в 4 дня, прореживался так, что при классификации использовались только каждое второе, а затем каждое третье изображение, так что интервал между изображениями составлял соответственно 4, 8 и 12 дней. Зависимость точности классификации от величины временного интервала между наблюдениями представлена на рис. 5.

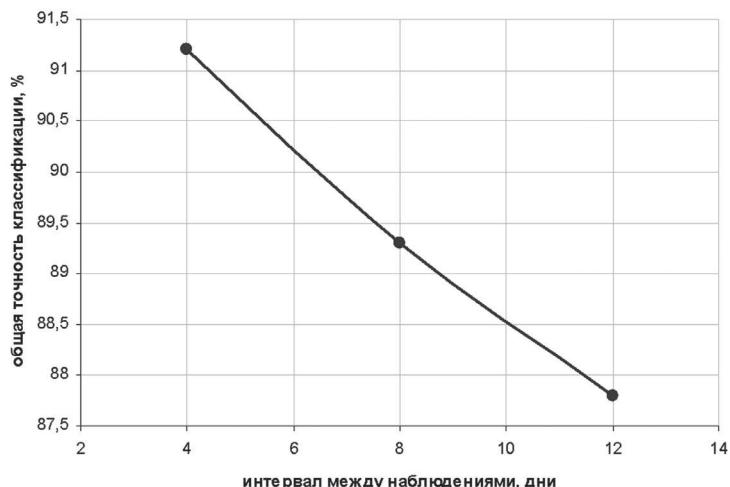


Рис. 5. Влияние величины временного интервала между последовательными значениями КСЯ временного ряда на точность классификации культур

Полученная зависимость указывает на монотонное снижение общей точности классификации при увеличении интервала между наблюдениями, хотя с практической точки зрения абсолютная величина указанного снижения не является существенной. Снижение точности можно объяснить интенсивным развитием сельскохозяйственной растительности и потерей некоторых отличий фенологической динамики между классами при прореживании временного ряда.

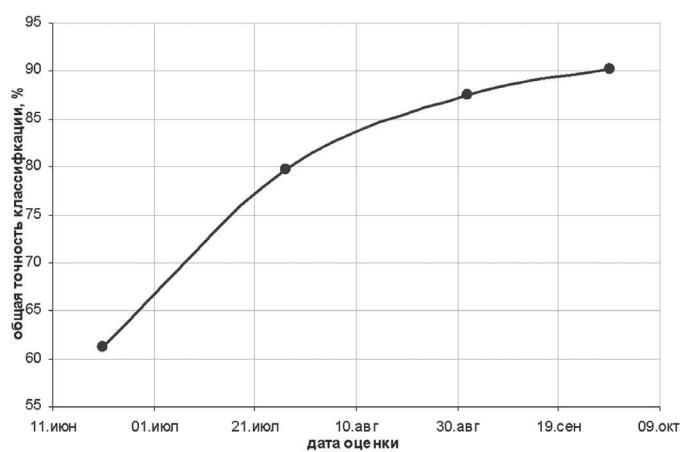


Рис. 6. Влияние длины временного интервала наблюдений на точность классификации культур

Задача раннего распознавания культур сопряжена с использованием более короткого, по сравнению с периодом вегетации, временного отрезка, в течение которого должны успеть проявиться фенологические особенности их развития. Экспериментальная оценка зависимости точности классификации культур от длины этого временного отрезка выполнялась на основе ряда КСЯ с 4-х дневным интервалом между последовательными измере-

ниями. При изменении длины используемого временного интервала менялось соответствующее ему количество признаков распознавания. В результате, измеряемый от даты начала вегетации более короткий временной отрезок соответствовал более ранней дате оценки точности классификации, а более длинные отрезки времени – поздним датам (рис.6).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование большего количества признаков, последовательно описывающих сезонную фенологическую динамику, сопровождается увеличением точности распознавания классов с постепенным насыщением к моменту окончания вегетационного сезона. Рисунок 6 указывает на существенный рост точности после достижения сезонного максимума вегетационного индекса (10-15 июля, рис. 3), а наибольшая точность классификации достигается после окончания сезона вегетации.

Таким образом, наивысшая общая точность классификации была достигнута при использовании 4-дневного интервала наблюдений (минимально возможного) на протяжении всего вегетационного периода. При этом точность оценки на 1-е сентября оказалась лишь немногим ниже таковой для 29-го сентября (87,5% против 90,2% соответственно). Результаты классификации по указанному набору признаков в сравнении с данными полевых обследований представлены на рис.7. Матрица перепутывания всех классов при лучшем найденном наборе признаков представлена в таблице 3.

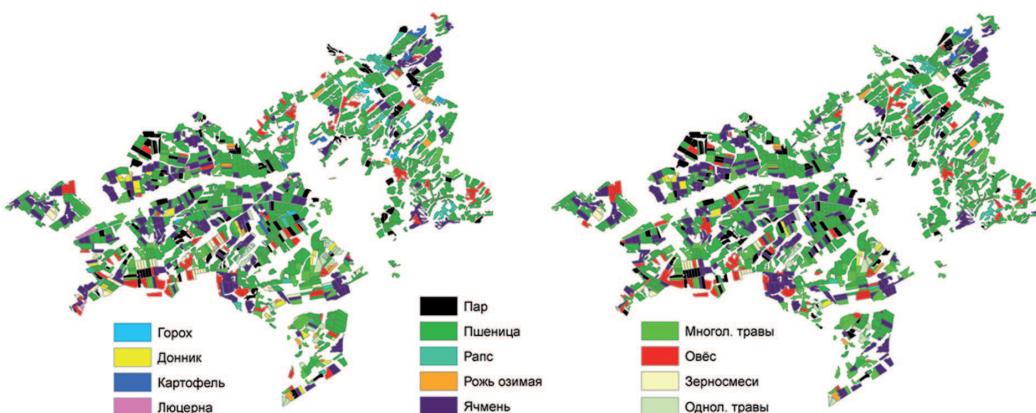


Рис. 7. Результаты наземного обследования (слева) в сравнении с результатами классификации (справа), полученными по оптимальному набору признаков

Таблица 3. Матрица перепутывания классов в пространстве сезонных значений КСЯ

красного и ближнего ИК диапазонов

Распознавание по спутниковым данным											% пропусков	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Донник	1	138	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1,4
Картофель	2	0	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
Многол. травы	3	0	0	741	7	2	3	34	0	0	17	7,8
Овёс	4	0	0	5	462	0	0	85	0	0	13	18,2
Однол. травы	5	0	0	0	0	168	0	5	0	0	2	4,0
Пар	6	0	0	13	1	0	409	18	0	0	5	8,3
Пшеница	7	0	0	16	37	0	15	3182	0	0	92	4,8
Рапс	8	0	0	0	0	0	0	0	143	0	0	0,0
Рожь озимая	9	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0	0,0
Ячмень	10	0	0	5	0	0	4	263	0	0	1205	18,4
% ошибочных включений		0,0	0,0	5,0	8,9	1,2	5,1	11,3	0,0	0,0	9,7	91,2

Примечание: классы «горох» и «люцерна» были исключены из анализа ввиду недостаточной репрезентативности соответствующей им опорной выборки для распознавания культур в пространстве признаков высокой размерности.

Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют экспериментально оценить возможности распознавания агрокультур на основе сезонных временных серий спутниковых данных, полученных спектрорадиометром MODIS. Исследованы возможности распознавания культур как по данным измерений КСЯ в видимом и ИК диапазонах длин волн, так и по полученным на их основе значениям перпендикулярного вегетационного индекса.

Полученные результаты позволяют сделать выводы о том, что распознавание широкого класса агрокультур, отличающихся существенными различиями фенологического развития в течение вегетационного сезона, возможно с достаточно высокой интегральной точностью на основе обоих указанных выше подходов к их спектрально-временному описанию. При рассмотрении группы яровых культур, обладающих сходной сезонной динамикой значений вегетационного индекса, продемонстрирован высокий уровень разделимости отдельных агрокультур на основе их фазовых портретов в двумерном пространстве значений КСЯ. При этом использование временных рядов данных КСЯ в качестве независимых признаков обеспечивает высокую точность распознавания широкого набора агрокультур, включая группу яровых культур.

При организации оперативного сельскохозяйственного мониторинга больших территорий важно обеспечить минимизацию вычислительных затрат при сохранении достаточного уровня точности дистанционного распознавания агрокультур. Проведенный в данной работе анализ показывает, что последовательный рост величины временного интервала между используемыми для классификации последовательными значениями ряда сезонных измерений КСЯ в интервале от 4-х до 12-ти дней, приводит к незначительному снижению точности распознавания агрокультур (менее 3.5%). При этом необходимо иметь ввиду, что уровень влияния указанного временного интервала на точность распознавания агрокультур определяется и качеством предварительной обработки спутниковых данных, включавшей в данном случае фильтрацию аномальных выбросов, заполнение пропусков и сглаживание временных серий данных.

Для получения заблаговременных прогнозов урожая важно обеспечивать максимально возможно ранее распознавание агрокультур в течение вегетационного сезона. Результаты выполненных экспериментов показали, что наиболее быстрый рост точности распознавания агрокультур происходит в первой половине сезона вегетации, а практически приемлемый уровень интегральной точности (80%) может быть достигнут уже к концу июля.

Литература

1. Лупян Е.А., Барталев С.А., Савин И.Ю. Технологии спутникового мониторинга в сельском хозяйстве России // Аэрокосмический курьер. 2009. № 6. С.47-49.
2. Genovese G., Baruth B., Royer A., Burger A. MARS STAT action of the European Commission – Crop and Yield Monitoring Activites // GeoInformatics vol.10, no. 4 , p. 20-22.

3. Барталев С.А., Лупян 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.
4. Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю. Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2005. Том 2. № 2. С. 228-236.
5. Плотников Д.Е., Барталев С.А., Лупян Е.А. Метод детектирования летне-осенних всходов озимых культур по данным радиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2008. Выпуск 5. Том 2. С. 322-330.
6. Doraiswamy, P.C., Akhmedov, B., Stern, A.J. Crop classification in the U.S. Corn Belt using MODIS imagery. In: Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), July 23-27, 2007, Barcelona, Spain. 2007 CDROM.
7. Defourny P., Vanhalle L., Blaes X. Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series. // Remote Sensing of Environment, vol. 96, Issues 3-4, 2005. pp. 352-365.
8. Шевырногов А.П., Зоркина Т.М., Жукова В.М., Жукова Е.Ю., Жидкая М.В. Изучение сезонной динамики сельскохозяйственных посевов на территории Хакасии по снимкам Terra Modis // Сибирский Вестник сельскохозяйственной науки. 2007. №5. С. 29-35.
9. Сидько А.Ф., Пугачева И.Ю., Шевырногов А.П. Исследование динамики спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур в период вегетации на территории Красноярского края. // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2009. – №2 – С. 100-110.
10. Brodsky, L., Vobora, V., Sourkova, L., Kodesova, R. Supervised crop classification from middle-resolution multitemporal images. In Proc. 2nd MERIS – (A)ATSR Workshop, Eds H. Lacoste & L. Ouwehand, ESA SP-666, 2008, CDROM.
11. Нейштадт И.А. Построение безоблачных композитных спутниковых изображений MODIS для мониторинга растительности. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2006. Т. 2. С. 359-365.
12. 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 локально-адаптивной классификации // Компьютерная оптика, Том 35, №1. Самара: ИСОИ РАН, 2011. С.103-116.

An experimental assessment of crop types recognisability using time-series of intra-seasonal spectral reflectance measurements by satellite sensor

D.E. Plotnikov¹, S.A. Bartalev¹, V.O. Zharko¹, V.V. Mihailov², O.I. Prosyannikova²

¹ Space Research Institute of Russian Academy of Sciences

117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya

E-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

² FGA Agrochemical survey center «Kemerovsky»

650510, Kemerovskaya region, Novostroyka, 15 Tsentralnaya

E-mail: agrohim_42@mail.ru

The article describes results of the study focused on assessment of possibilities to recognise multiple crop types based on measurements of intra-seasonal spectral reflectance values using the satellite spectroradiometer Terra-MODIS. The comparative analysis of the crop types' separability has been performed on the base of the phase space of Red and NIR spectral channels of MODIS along with perpendicular vegetation index (PVI) seasonal time-series. Crops recognition accuracy is estimated depending on duration and frequency of regular satellite observations.

Keywords: remote sensing, spectral reflectance, time-series analysis, crop recognition.