

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДАННЫХ ВСЕРОССИЙСКОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПЕРЕПИСИ

Введение

Спутниковые средства наблюдения Земли используются сегодня для решения широкого круга научных и прикладных задач. Это стало возможным благодаря наличию спутниковых систем, позволяющих обеспечить высокую частоту наблюдения и снизить стоимость спутниковой информации, появлению новых технологий работы со спутниковой информацией, обеспечивающих оперативный доступ к большим архивам данных.

По заказу Росстата в ходе подготовки к проведению Всероссийской сельскохозяйственной переписи (ВСХП) 2006 года была разработана технология контроля данных переписи с использованием средств спутникового мониторинга.

В этой работе принимали участие Федеральная служба государственной статистики, Министерство сельского хозяйства РФ, Федеральная служба государственной регистрации кадастра и картографии (Росреестр) и Институт космических исследований РАН.

По каждому субъекту Российской Федерации контролировались данные о наличии неиспользуемых и используемых земель.

Повторно данные дистанционного зондирования были применены при проведении пробной сельскохозяйственной переписи в 2012 году в отдельных районах Воронежской и Ростовской областей.

Основными задачами применения технологии спутникового мониторинга являлись:

- получение информации о состоянии сельскохозяйственных земель на основе средств спутникового мониторинга для контроля данных ВСХП;
- методически обоснованное сравнение данных спутникового мониторинга и ВСХП для выявления районов, по которым полученную в ходе переписи информацию нельзя считать полностью достоверной;
- предоставление инструментов специалистам Федеральной службы государственной статистики РФ для проведения сравнительного анализа данных спутникового мониторинга и ВСХП;
- предоставление переписчикам справочной информации, полученной на основе спутникового мониторинга и инструментов работы с ним для оперативной проверки собираемых данных.

На основе средств спутникового мониторинга осуществлялся контроль данных ВСХП по следующему набору показателей:

- площадь пашни (в том числе посевная площадь);
- площадь залежи;

- площадь, занятая сенокосами и пастбищами;
- площадь, занятая многолетними насаждениями.

Контролировался этап сбора и обработки данных по выше перечисленным показателям, интегрированным на следующие территориальные уровни:

- крупные сельскохозяйственные организации;
- муниципальные районы;
- субъекты Российской Федерации;
- федеральные округа.

Для отнесения сельскохозяйственного участка к тому или иному сельскохозяйственному производителю привлекались службы землеустроителей при сельскохозяйственных управлениях.

Построенные в результате карты с указанием земель были направлены в территориальные органы государственной статистики и руководителям отдельных субъектов Российской Федерации.

На основе опыта Росстата ниже в разделе 1 рассматриваются технологии обработки спутниковых данных, а в разделе 2 рассказывается об опыте апробации системы контроля данных сельскохозяйственной переписи.

1. Исходные данные и методы их обработки

1.1 Характеристика данных

Наблюдение за сельскохозяйственными угодьями осуществляется с использованием широкого спектра приборов дистанционного зондирования (ДЗ), различающихся уровнем пространственного разрешения, спектральными каналами и частотой наблюдения. Данные среднего разрешения (250 м), получаемые спутниковой системой Terra-MODIS, позволяют вести наблюдения с высокой частотой и пространственным разрешением, достаточным для наблюдения крупных сельскохозяйственных полей и распознавания типов сельскохозяйственных угодий. Данные высокого разрешения (15-30 м) Landsat-TM/ETM+ применяются для картографирования границ полей и распознавания некоторых типов сельскохозяйственных угодий. Данные детального пространственного разрешения (2 м) Ресурс-ДК, применяются для выборочных наблюдений, для проведения визуального дешифрирования с высокой точностью, например, для уточнения границ сельскохозяйственных угодий, а также определения некоторых их типов.

1.2. Технологии обработки

При решении задач мониторинга сельскохозяйственных угодий используются вегетационные индексы, основанные на измерениях в подходящих для этих задач диапазонах длин волн. Информативными для мониторинга сельскохозяйственных угодий являются диапазоны, расположенные в видимой и инфра красной области спектра, т.к. отраженное излучение на этих длинах волн позволяет характеризовать состояние растительности, содержание в зелёной массе хлорофилла, азота, влаги.

К числу наиболее часто используемых вегетационных индексов относятся NDVI, PVI и RVI. С точки зрения концепции почвенной линии наиболее простым почвенно-адаптивным индексом является перпендикулярный вегетационный индекс PVI, зарекомендовавший себя для мониторинга сельскохозяйственных угодий на неоднородных территориях. Значение PVI (R_1, R_2), рассчитывается в пространстве значений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) красного и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов как евклидово расстояние от точки с координатами (R_1, R_2) до линии почв. Уравнение линии почв $R_2 = 1,1 R_1 + 0,05$ в этом пространстве получается линейной аппроксимацией экспериментальных данных о КСЯ открытой почвы в различных регионах при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,9$. При этом PVI вычисляется как $PVI(R_1, R_2) = -0,74R_1 + 0,67R_2 - 0,034$.

Временной ряд рассчитанных на основе композитных изображений значений вегетационного индекса (ВИ) для элемента изображения может содержать пропуски, количество которых более велико в весенний и осенний периоды и уменьшается в летний период с ростом числа безоблачных дней. Для устранения возникающих недостатков используются алгоритмы пост-обработки временных серий: исключение выбросных значений, заполнение пропусков данных и коррекция временных серий ВИ.

Для исключения зашумленных и заполнения пропущенных значений во временных сериях дистанционных измерений используется алгоритм оконной аппроксимации полиномом второй степени вида $f(t) = at^2 + bt + c$. Алгоритм предусматривает использование скользящего вдоль оси времени окна, включающего фиксированное количество ненулевых измерений для вычисления коэффициентов полинома. Поиск значений коэффициентов основан на методе наименьших квадратов. Размер окна выбирается с учётом особенностей развития растительности в течение вегетационного периода. Для задач распознавания сельскохозяйственных угодий был выбран четырёхдневный интервал между измерениями и окно локализации шириной 2 валидных измерения. Принцип работы алгоритма заключается в получении оценки для каждого измерения временного ряда, на основе, которой, принимается решение о валидности данного измерения. После вычисления коэффициентов локального полинома становится возможным вычислить соответствующую оценку для всех элементов временной серии.

1.3. Технологии распознавания сельскохозяйственных угодий по данным MODIS

В технологии контроля результатов сельскохозяйственной переписи используется адаптивный алгоритм распознавания участков используемых пахотных земель. Признаки распознавания созданы на основе многолетних спутниковых рядов PVI и учитывают характерные отличия сезонной и межгодовой динамики развития между естественной растительностью и используемой пашней ввиду наличия явления севооборота. В основу алгоритма распознавания озимых культур положен анализ подготовленных на этапе предварительной обработки временных рядов PVI, построенных с использованием четырёхдневных композитных изображений MODIS, что позволяет учесть динамику фенологических показателей. Одним из

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 свойственной снижением значений указанных параметров.

Помимо пахотных земель технологией контроля результатов сельскохозяйственной переписи предусмотрено детектирование земель сельскохозяйственного использования на основе многолетних рядов спутниковых данных MODIS. В основу признака распознавания земель сельскохозяйственного использования положен анализ первой и второй производной временной серии измерений PVI. Признак демонстрирует высокие значения на участках, где ведется активное использование в течение нескольких лет, таких как, например, естественные сенокосы и пастбища.

1.4. Технология выделения границ и распознавания сельскохозяйственных угодий по данным Landsat-TM/ETM+

В рамках технологии контроля результатов сельскохозяйственной переписи спутниковые данные Landsat-TM/ETM+ используются для построения цифровых карт границ сельскохозяйственных угодий. Основной задачей при этом является визуальное отделение сельскохозяйственных угодий от других категорий земель (лесов, населенных пунктов, дорог, водоемов). Для этого выбираются соответствующие спутниковые данные, характеризующиеся минимальной облачностью. Использовать необходимо наилучшую сцену текущего или предыдущего года. В силу особенностей объекта оконтуривания, желательно использование 2-3-х сцен Landsat-TM/ETM+, полученные в разные периоды вегетации (весна, лето, осень) одного года. В случае недостатка информации, возможно включение в анализ сцен предыдущего года. В качестве основных индикаторов, определяющих принадлежность объекта к категории сельскохозяйственных угодий, выступают:

- Характер границ объекта (в случае пахотных земель границы правильные и четкие, в случае пастбищ границы размытые, неправильной формы);
- Особенности контура (в случае пастбищ наблюдается характерный размытый рисунок);
- Близость к водоемам и населенным пунктам (пастбища и сенокосы в большинстве случаев находятся в поймах рек или рядом с населенными пунктами).

1.5. Технология распознавания многолетних насаждений и залежных земель на основе спутниковых данных Ресурс-ДК

Спутниковые данные детального пространственного разрешения являются дополнительным источником информации при распознавании типа сельскохозяйственных угодий, так как они позволяют визуально выделять многолетние насаждения и залежные земли. При этом, в качестве вспомогательного материала могут выступать данные высокого и среднего пространственного разрешения, в частности временные серии спектральных индексов, полученные по данным MODIS. В

частности, для залежных земель характерна близкая сезонная динамика значений вегетационного индекса в силу отсутствия севооборота сельскохозяйственных культур и отсутствия признаков хозяйственной деятельности. Основным дешифровочным признаком при распознавании многолетних насаждений по данным детального разрешения является текстура изображений. Многолетние насаждения характеризуются наличием кустарников и деревьев, а также регулярной структурой посадок, которые хорошо видны на спутниковых данных данного типа. Также, для многолетних насаждений характерны правильные границы контуров сельскохозяйственных угодий. Для залежных земель характерно наличие кустарников и деревьев в пределах контуров полей, а также наличие локальной нечеткости текстуры и возникновение пятнистого рисунка изображения.

2. Апробация системы контроля данных сельскохозяйственной переписи

2.1. Районы пробной сельскохозяйственной переписи

Технология контроля данных Всероссийской сельскохозяйственной переписи апробировалась на примере данных пробной сельскохозяйственной переписи 2012 года Семикаракорского муниципального района Ростовской области и Лискинского района Воронежской области (далее – районы проведения пробной переписи). В обоих выбранных районах проведения сельскохозяйственной переписи представлены все заданные типы сельскохозяйственных угодий, а именно: пашня, сенокосы, пастбища, залежь и многолетние насаждения. При этом в их структуре площади сельскохозяйственных угодий преобладают пахотные земли (как правило, они занимают более 75% общей площади с/х угодий), а также значительные площади (15-20%) заняты сенокосами и пастбищами. Доля площади таких категорий с/х угодий, как многолетние насаждения и залежь, относительно не велика и в совокупности не превышает 3-5%.

2.2. Данные Росстата

Для апробации технологии контроля данных Всероссийской сельскохозяйственной переписи о состоянии сельскохозяйственных земель с использованием средств спутникового мониторинга был создан макет системы спутникового контроля данных сельскохозяйственной переписи (МСКД-ВСХП), позволяющий работать со всем набором информации по регионам проведения пробной переписи. Федеральная служба государственной статистики РФ предоставила данные ВСХП 2006, а также данные пробной переписи 2012 года для Семикаракорского муниципального района Ростовской области и Лискинского района Воронежской области. Данные ВСХП 2006 включают в себя информацию о распределении площади земель по основным типам угодий для хозяйств различных категорий. Кроме того, дается информация о площади фактически используемых земель. Данные пробной переписи 2012 года по данным районам включают в себя информацию о

распределении площади земель по основным категориям сельскохозяйственных угодий для хозяйств различных категорий. Также дается информация о площади фактически используемых земель и площади посевов по урожай 2012 года.

2.3. Сравнительный анализ данных пробной переписи и результатов спутникового мониторинга

Как видно из Таблицы 1, разница между общей площадью сельскохозяйственных угодий по результатам спутниковой оценки и данным пробной переписи Семикаракорского района Ростовской области, составляет около 3900 Га.

Таблица 1

Сравнение площади категорий с/х угодий Семикаракорского района Ростовской области по данным переписи и спутниковой оценки

Категория с/х угодий	Площадь переписи, га	Площадь по спутниковым данным, га	Различие, %
Пашня	67965,27	69209,32	1,8
В т.ч. посевная площадь	56546,5	62247,68	10,1
Сенокосы	2116,01	2915,96	37,8
Пастбища	8961,67	9596,62	7,0
Многолетние насаждения	1706,55	2945,81	72,6
Залежь	817,4	758,87	-7,2
Общая площадь	81560,9	85426,58	4,7

Анализ распределения площади по категориям сельскохозяйственных угодий показывает, что наибольшие различия наблюдаются для сенокосов и многолетних насаждений. Возможное объяснение такого рода различий площади сенокосных угодий может быть связано с тем, что фермеры декларируют для переписи, только постоянно используемые для сенокосов естественные и культурные угодья. При этом, не находящиеся в собственности фермеров естественные сенокосы, на которых скашивание ведется эпизодически, могут не учитываться. Различия площади многолетних насаждений могут быть вызваны использованием данных детального пространственного разрешения за временной период 2007-2009 гг. При этом, в период между получением указанных спутниковых данных и проведением пробной переписи, часть многолетних насаждений, в силу различных причин, могла перейти в другие категории угодий. Расхождения в посевных площадях могут быть связаны с наличием полей, не используемых под посевы в момент проведения переписи. В частности, поля, не подготовленные под пар и не являющиеся многолетними травами, по данным спутникового мониторинга автоматически относились к посевной площади. В то же время, в число таких полей могли попасть земли, которые не использовались меньше года и во время проведения переписи могли не включаться в посевные площади. Также стоит отметить необходимость выработки четких определений категорий

сельскохозяйственных угодий и критериев, не допускающих неоднозначного толкования при отнесении сельскохозяйственных угодий к той или иной категории. В настоящее время при проведении сельскохозяйственной переписи используются следующие определения:

сенокос – сельскохозяйственное угодье, систематически используемое под сенокосение;

пастбище – сельскохозяйственное угодье, систематически используемое для выпаса животных, и такое использование является основным, а также земельные участки, пригодные для выпаса скота, не используемые по сенокос и не являющиеся залежью.

При использовании данных определений могут возникать трудности классификации категорий сельскохозяйственных угодий. Так, посевы многолетних трав, относящиеся к категории пахотных земель, как правило, систематически используются под сенокосение или выпас животных. Также встречаются угодья, которые могут использоваться как под сенокосение, так и под выпас животных в течение одного сезона. Различия результатов пробной переписи и спутниковой оценки общей площади с/х угодий Лискинского района Воронежской области (Таблица 2) может быть связано с тем, что в этом районе значительная часть сельскохозяйственных угодий относится к микропредприятиям, крестьянским (фермерским) хозяйствам и индивидуальным предпринимателям, а также хозяйствам населения.

Таблица 2

Сравнение площади категорий с/х угодий Лискинского района Воронежской области по данным переписи и спутниковой оценки

Категория с/х угодий	Площадь переписи, га	Площадь по данным переписи только для с/х организаций, га	Площадь по спутниковым данным, га	Различие, %
Пашня	106365,1	96586,0	97314,86	-8,5
В т.ч. посевная площадь	95449,5	85959,2	90506,19	-5,2
Сенокосы	6937,7	6466,0	6311,45	-9,0
Пастбища	25763,9	25547,0	22829,93	-11,4
Многолетние насаждения	1614,2	285,0	1521,54	-5,7
Залежь	6	6	47,85	697,4
Общая площадь	140680,9	128884	128025,62	-9,0

При рассмотрении данных пробной переписи только для сельскохозяйственных организаций, расхождения значительно уменьшаются. В частности, близкими становятся оценки площади сенокосов и пахотных земель. По спутниковым данным выявлена большая площадь залежных земель, что видимо, связано с тем, что данные земли какое-то время не используются, но относятся землевладельцами к пахотным угодьям. В случае многолетних насаждений, их площадь, оцененная по спутниковым данным, близка к площади многолетних насаждений по всем категориям хозяйств,

полученной по результатам переписи (1614 Га). Значительные расхождения остаются для пастбищ, даже при сравнении с данными для сельхозпредприятий (10,6%).

Выявленные различия оценок площади категорий сельскохозяйственных угодий по результатам пробной переписи и спутниковым данным могут быть вызваны различными причинами, в частности:

- недостоверность сведений о площади реально используемых сельскохозяйственных угодий, полученных в ходе опроса при проведении переписи;
- неполнота выделения границ сельскохозяйственных угодий по спутниковым данным;
- ошибки распознавания категорий сельскохозяйственных угодий по спутниковым данным.

Выполненный при проведении апробации МСКД-ВСХП анализ показывает, что ошибки оценки площади, вызванные неполнотой выделения границ сельскохозяйственных угодий по спутниковым данным в значительной степени определяются статистическим распределением размеров участков (полей). Так при возрастании средних размеров полей повышается и полнота выделения их границ. Как показывает пример Лискинского района Воронежской области, при наличии большого числа мелких по площади участков, характерных для хозяйств населения и микро предприятий, выделение границ сельскохозяйственных угодий по спутниковым данным может отличаться существенной неполнотой. В этой связи, при выделении границ сельскохозяйственных угодий целесообразно ограничиться минимальной величиной площади участков включаемых в сравнительный анализ. Исходя из полученных в ходе апробации макета системы на районах пробной переписи экспериментальных данных, в качестве минимальной величины площади выделяемых участков можно принять величину 5 Га.

Относительная ошибка оценки площади категорий сельскохозяйственных угодий, вызванная ограничениями точности их распознавания, в значительной мере зависит от используемых спутниковых данных, эффективности методов их обработки и интегральной площади угодий в пределах рассматриваемой территории. Точная оценка такого рода ошибок требует проведения специальных исследований с привлечением опорных данных, полученных для регионов с различными физико-географическими и агротехническими условиями ведения сельского хозяйства. Основываясь на результатах ранее выполненных исследований и экспертных знаний можно дать ориентировочную оценку ожидаемого (предельно достижимого) уровня ошибки определения площади категорий сельскохозяйственных угодий по спутниковым данным (Таблица 3).

Таблица 3

Диапазоны предельно допустимой относительной ошибки оценки площади сельскохозяйственных угодий на основе спутниковых данных

Категория с/х угодий	Интегральная площадь с/х угодий в пределах территориального образования			
	<10 ² Га	10 ² -10 ³ Га	10 ³ -10 ⁵ Га	>10 ⁵ Га
	Ошибка измерения площади контуров			
Пашня	<5%	3-5%	2-3%	<2%
Посевная площадь	<5%	3-5%	2-3%	<2%
Сенокосы и пастбища	<10%	5-10%	3-5%	<3%
Многолетние насаждения	<5%	3-5%	2-3%	<2%
Залежь	<10%	5-10%	3-5%	<3%

Выводы

Основными информационными ресурсами, которые должны быть созданы для реализации технологии спутникового мониторинга являются:

- границы полей (однородных сегментов сельхозугодий);
- границы используемой пашни;
- границы земель, занятые посевами сельхоз культур;
- границы залежных земель;
- границы сенокосов и пастбищ;
- границы земель, занятые многолетними насаждениями.

Одним из важнейших результатов использования спутникового мониторинга может быть формирование цифровых карт по районам проведения переписи:

- карты обрабатываемых пахотных земель;
- карты залежных земель;
- карты сенокосов и пастбищ;
- карты многолетних насаждений;
- карты посевов озимых и яровых сельскохозяйственных культур;
- карты площадей, занятых парами.

По результатам выполненной апробации можно сделать вывод о том, что данные спутниковых наблюдений и разработанный макет системы МСКД-ВСХП могут обеспечить эффективную инструментальную основу технологии контроля достоверности результатов сельскохозяйственной переписи. При этом, ключевым компонентом технологии контроля данных переписи является блок распознавания категорий сельскохозяйственных земель на основе комбинированного использования автоматических методов классификации спутниковых изображений и методов их интерактивной интерпретации экспертами с помощью развитых инструментов визуализации и комплексирования различных типов данных дистанционного зондирования.

Для повышений точности автоматических алгоритмов, возможно привлечение экспертной оценки, которая может базироваться на интерпретации всех видов данных, которые будут доступны в системе. Для повышения качества данных работ возможно использование спектрально-временных признаков, которые могут помочь в принятии решений. Стоит отметить, что для визуальной интерпретации допустимо использование признаков, которые по тем или иным причинам не могут быть использованы для автоматической классификации. Но остаются достаточно информативными и могут быть использованы экспертом.

Необходимо также уточнение критериев отнесения пахотных земель к посевным площадям, а также уточнения алгоритма отнесения угодий к пастбищам и сенокосам.

Одновременно, результаты выполненной апробации убедительно продемонстрировали, что эффективность технологии контроля результатов Всероссийской сельскохозяйственной переписи на основе системы МСКД-ВСХП в значительной мере будет определяться уровнем автоматизации обработки спутниковых данных, достигнутым к моменту начала работ по проведению переписи. В частности, выявление границ и распознавание типов сельскохозяйственных угодий, выполнялось, в значительной степени на основе визуального анализа, что является трудоёмкой задачей. Опыт выполнения настоящей технологической работы позволяет сделать вывод о необходимости доработки ряда технологий автоматической обработки спутниковых данных. При этом к числу важных направлений исследований и разработок можно отнести:

- 1) Развитие методов автоматической обработки спутниковых данных высокого пространственного разрешения для выделения границ однородных участков (сегментов) сельскохозяйственных угодий;
- 2) Разработка новых спектрально-временных признаков распознавания для классификации залежных земель, многолетних насаждений, сенокосов и пастбищ, а также многолетних трав;
- 3) Развитие методов автоматической обработки спутниковых данных среднего пространственного разрешения для классификации типов сельскохозяйственных угодий на основе спектрально-временных признаков распознавания;
- 4) Развитие методов автоматической обработки спутниковых данных детального пространственного разрешения для классификации типов сельскохозяйственных угодий на основе текстурных признаков распознавания;
- 5) Разработка оптимальной технологической схемы комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения для оценки площади типов сельскохозяйственных угодий РФ.

Выполнение указанных выше работ, направленных на максимально возможную автоматизацию обработки спутниковых данных, позволит многократно сократить трудоемкость, а, следовательно, и стоимость работ в ходе проведения Всероссийской сельскохозяйственной переписи.

Эффективность контроля достоверности результатов переписи определяется, прежде всего, возможностями системы по дистанционному распознаванию категорий

сельскохозяйственных угодий, обеспечений оценки их площади в разрезе территориальных образований различных уровней, организации доступа пользователей к получаемым данным и предоставлению инструментов их сравнительного анализа.

Список литературы

1. Институт космических исследований РАН, «Описание основных технологических решений по контролю данных сельскохозяйственной переписи о состоянии земельных ресурсов на основе средств спутникового мониторинга», этап I, том 1. Этап 2012 г.
2. Институт космических исследований РАН, «Макет системы контроля данных сельскохозяйственной переписи о состоянии земельных ресурсов с использованием средств спутникового мониторинга и рабочая документация, включая инструкцию по эксплуатации макета системы», этап I, том 2. Этап 2012 г.
3. Институт космических исследований РАН, «Отчёт о проведении апробации системы контроля данных сельскохозяйственной переписи», этап I, том 3. Этап 2012 г.
4. Институт космических исследований РАН, «Отчёт о результатах выполнения работы, включая предложения по использованию и развитию технологий спутникового мониторинга для контроля данных Всероссийской сельскохозяйственной переписи», этап II. Этап 2012 г.
5. Лупян Е.А. «Технологии построения систем дистанционного мониторинга», Институт космических исследований РАН, Тринадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»
http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5419