

Л. А. Сладких (Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета»)

В 1976 г. окончила Иркутский государственный университет по специальности «География». В настоящее время — ведущий специалист отдела научно-исследовательской работы Сибирского центра ФГБУ «НИЦ «Планета».

М. Г. Захватов (Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета»)

В настоящее время — заведующий отделом научно-исследовательской работы Сибирского центра ФГБУ «НИЦ «Планета».

Е. И. Сапрыкин

(Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета»)

В 2010 г. окончил механико-математический факультет Новосибирского государственного университета. В настоящее время — младший научный сотрудник отдела научно-исследовательской работы Сибирского центра ФГБУ «НИЦ «Планета».

Е. Ю. Сахарова

(Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета»)

В 2011 г. окончила Сибирскую государственную геодезическую академию по специальности «Исследование природных ресурсов аэрокосмическими средствами». В настоящее время — младший научный сотрудник отдела научно-исследовательской работы Сибирского центра ФГБУ «НИЦ «Планета».

Технология мониторинга состояния посевов по данным дистанционного зондирования Земли на юге Западной Сибири

Интенсивное развитие данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в последние десятилетия открыло новые возможности оперативного мониторинга посевов сельскохозяйственных культур. Определяющим признаком сельскохозяйственной культуры и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся широким диапазоном в отражении излучения разных длин волн. С развитием средств спутниковых измерений и расширением группировки спутников ДЗЗ стало возможным решение самых разнообразных задач в области сельского хозяйства, в том числе: построение и уточнение схем внутрихозяйственного землеустройства, расчет площадей полей и рабочих участков, идентификация сельскохозяйственных культур и неиспользуемых земель, оценка состояния посевов и прогнозирование урожайности.

Важно отметить, что одной из основных особенностей спутникового мониторинга состояния посевов является необходимость выполнения двух условий: высокое пространственное и временное разрешение. Высокое пространственное разрешение обеспечивает наблюдение за небольшими участками поля с возможностью оценки состояния посевов. Временное разрешение обеспечивает мониторинг динамики роста и развития растений как в течение одного вегетационного периода, так и сравнение и анализ данных NDVI вегетационных сезонов за несколько лет.

К основным преимуществам использования данных ДЗЗ относят: высокую достоверность и оптимальную периодичность получения информации, широкий охват исследуемой территории, получение данных в едином стандартизированном виде,

возможность накопления статистической информации с дальнейшим ретроспективным анализом для прогноза урожайности и оценки состояния посевов [1].

Разработанная в ФГБУ «НИЦ «Планета» технология мониторинга состояния посевов посредством спутниковых наблюдений включает в себя два взаимосвязанных направления работы: прогнозирование урожайности на отдельных полях, хозяйствах, административных районах, областях; оценку состояния посевов по трем градациям, принятым в агрометеорологии: хорошее состояние посевов, удовлетворительное и плохое.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ

Оценка характеристики растительности производится с расчетом вегетационных индексов. Вегетационный индекс — это показатель, рассчитываемый в результате операций с различными спектральными диапазонами электромагнитного спектра. Отражение растительного покрова в красной и ближней инфракрасной областях электромагнитного спектра тесно связано с его структурой и состоянием. Для того, чтобы количественно оценить состояние растительности, широко применяется нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Индекс учитывает красную зону электромагнитного спектра вблизи 0,63 мкм и ближнюю инфракрасную зону около 0,86 мкм.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где **NIR** — отражение в зоне ближнего инфракрасного спектра; **RED** — отражение в зоне красного спектра.

В красной области спектра представлен максимум поглощения солнечной радиации

хлорофиллом, в инфракрасной области спектра — максимум отражения клеточными структурами листа [2].

Реализации идеи создания технологии мониторинга состояния посевов послужили модификация модели EPIC в программный комплекс SDIM и создание алгоритма оценки состояния посевов зерновых культур. Американская модель биопродуктивности EPIC разработана в Техасской сельскохозяйственной научно-исследовательской лаборатории (Temple, TX, Soil and Water Research Laboratory), автор Dr. Williams [3]. Непосредственное использование модели EPIC было весьма затруднено из-за отсутствия многих параметров, вводимых в модель. Было принято решение модифицировать EPIC, в результате чего был создан программный комплекс SDIM (Sistem of Databases and Imitating Modeling). Модификация модели EPIC в программный комплекс SDIM проведена в Югорском НИИ информационных технологий, автор — кандидат технических наук В. М. Брыксин. Проведена корректировка и настройка программного комплекса SDIM на основе метеоданных и данных о фактической урожайности зерновых культур за период с 1985 по 2004 год. Ввод метеоданных за несколько лет мотивируется необходимостью адаптации программы к климатическим условиям Западной Сибири. В программном комплексе SDIM считается урожайность различных сельскохозяйственных культур (пшеница, овес, ячмень и др.). В SDIM содержится полный функциональный набор средств для ручной и автоматической обработки данных [4]. Индекс вегетации является основным предиктором в расчете прогноза урожайности в программном комплексе SDIM, кроме этого, вводятся наземные метеоданные по следующим параметрам (табл. 1):

- максимальная температура воздуха;
- минимальная температура воздуха;

Метеостанция	KRASNOZ	KRASNOZ	KRASNOZ	KRASNOZ	KRASNOZ
Широта	53,983	53,983	53,983	53,983	53,983
Долгота	79,25	79,25	79,25	79,25	79,25
Год	2012	2012	2012	2012	2012
Дата, месяц	01.05	02.05	03.05	04.05	05.05
Максимальная температура воздуха, °С	14,9	7,5	23,0	17,6	12,9
Минимальная температура воздуха, °С	7,1	3,5	11,7	7,1	3,6
Осадки, мм	4,0	4,0	0,8	0,0	9,0
Относительная влажность воздуха, %	82	92	66	90	84
Средняя скорость ветра, м/сек.	4,4	3,6	7,8	3,9	7,1
Суммарная солнечная радиация, ккал/кв. см	13,1	14,26	16,2	18,91	15,81

Табл. 1. Формирование файлов метеоданных

- суммарные суточные осадки;
- относительная влажность воздуха;
- средняя скорость ветра;
- суммарная солнечная радиация.

По перечисленным выше параметрам создана база метеоданных за 30 лет по 64-м метеостанциям Новосибирской области и Алтайского края за период с 1985 по 2016 год. Расчет прогноза урожайности на отдельных полях в хозяйстве и административных районах осуществляется по рассчитанному NDVI и данным ближайшей метеостанции. Для определения связей между NDVI и фактическим состоянием сельскохозяйственных культур необходимы измерения индекса вегетации на полях тестовых хозяйств, поэтому был определен перечень сельскохозяйственных предприятий, на полях которых ежегодно проводились съемы NDVI яровых зерновых культур. Тестовые хозяйства были выбраны в соответствии с агроклиматическим районированием Новосибирской области и разным уровнем интенсивности земледелия — хороший уровень земледелия,

средний (удовлетворительный) и низкий (плохой).

Проведены исследования зависимости значений NDVI и биомассы яровой пшеницы на полях 15-ти тестовых хозяйств Новосибирской области. Результаты исследования показали хорошую взаимосвязь биомассы пшеницы с усредненными, в рамках поля, значениями NDVI. Анализ спутниковых данных и фактической урожайности на полях тестовых хозяйств показал, что существует достаточно хорошая связь между значениями NDVI и урожайностью яровой пшеницы. Коэффициент корреляции значений индекса вегетации на отдельных полях и фактической урожайности яровой пшеницы составил 0,83.

Прогноз урожайности считается по отдельным полям в хозяйствах, административных районах и субъектах федерации. Для расчета прогноза необходимо ввести административную единицу (область, край), название метеостанции, дату сева культуры, дату уборки и, как минимум, три значения NDVI (за три даты съема спутниковых

данных). Чем больше съёмов, тем точнее результат прогноза. Точность прогноза значительно повышается при наличии безоблачных съёмов спутниковых данных максимальных NDVI, чаще всего это период с 1 по 20 июля. Итог расчетов: прогноз урожайности в центнерах с гектара. Первый предварительный прогноз урожайности можно посчитать к 30 июня (при наличии съёмов NDVI за три даты), основной прогноз считается к 21 июля, уточненный прогноз дается в августе. Средняя оправдываемость прогноза урожайности в хозяйствах составляет 87%, оправдываемость прогнозов по административным районам — 81%; за эти же годы по Новосибирской области оправдываемость прогнозов составила 84% (табл. 2).

Необходимо отметить, что данные с космического аппарата (КА) Terra со сканера MODIS (пространственное разрешение 250 м) позволяют работать с полями площадью не менее 100 га.

Наличие колок (участки кустарников и древесной растительности) на полях влечет за собой проблему «смешанных пикселей», которые необходимо исключать при расчете прогноза. Кроме этого, на качество и точность прогнозов влияют еще два весьма существенных фактора: во-первых, активность циклонических процессов в первой половине июля,

следствием чего является экранирование облачностью исследуемых территорий в период максимальных NDVI; во-вторых, весьма редкая сеть метеостанций — в административных районах площадью до 6 тыс. кв. км может быть только одна метеостанция.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ

Накопленная статистика измерений индекса вегетации в тестовых хозяйствах, создание базы метеоданных и фактической урожайности с 1985 года, архивная информация с КА Terra/MODIS послужили базой создания алгоритма оценки состояния посевов по трем градациям, принятым в агрометеорологии: хорошее состояние посевов, удовлетворительное и плохое на юге земледельческой зоны Западной Сибири (Омская, Новосибирская, Кемеровская области и Алтайский край) [5].

Для создания алгоритма оценки состояния посевов была проведена предварительная работа по инвентаризации сельскохозяйственных земель, схемы внутрихозяйственного землеустройства тестовых хозяйств переведены в цифровую форму хранения (рис. 1). По информации с КА Landsat 8 (пространственное разрешение 30 м) в ГИС-приложении ArcMap 10 построены векторные слои схем внутрихозяйственного землеустройства.

	Оправдываемость прогноза, %										Средняя оправдываемость прогнозов, %
	Годы										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
Хозяйства	88	82	97	84	90	97	87	—	68	81	87
Административные районы (Алтайский край, Новосибирская обл.)	—	—	90	84	88	87	85	67	66	78	81
Алтайский край, Новосибирская обл.	—	—	—	83	88	93	96	67	66	97	84

Табл. 2. Оправдываемость прогнозов урожайности



Рис. 1. Векторный слой схемы внутрихозяйственного землеустройства ФГУП «Кремлевское», Новосибирская обл.

При создании векторных слоев внутри полей взяты реперные точки, каждая из которых имеет свой порядковый номер. Векторные слои представляют собой определенные группы однотипных объектов. Это слои с реперными точками, полями, колками, дорогами, населенными пунктами, озерами, болотами и реками. За период с 2001 по 2011 год была проведена работа по расчету индекса NDVI в заданных реперных точках. Все реперные точки введены в базу данных и используются в дальнейшем для съема значений индексов вегетации при расчете прогноза урожайности в программном комплексе SDIM и в алгоритме оценки состояния посевов. Таким образом, создана уникальная база данных, позволяющая обеспечить пространственно-временной мониторинг состояния посевов. База данных включает в себя:

- геопривязанные реперные точки схем внутрихозяйственного землеустройства сельскохозяйственных предприятий;
- архив рассчитанных NDVI с 2001 по 2015 год по информации с КА Terra/MODIS.

Поскольку на территории региона большой процент земель не используется под сельскохозяйственные посевы, необходимо было выделить пахотные земли и неиспользуемые. Пахотные земли, например в Новосибирской области, составляют всего 13,5% от общей площади области.

По спектрально-динамическим признакам распознавания растительности проведена классификация земель в ГИС-приложении с последующей ручной коррекцией [6]. Созданы маски неиспользуемых земель, для каждого исследуемого района была

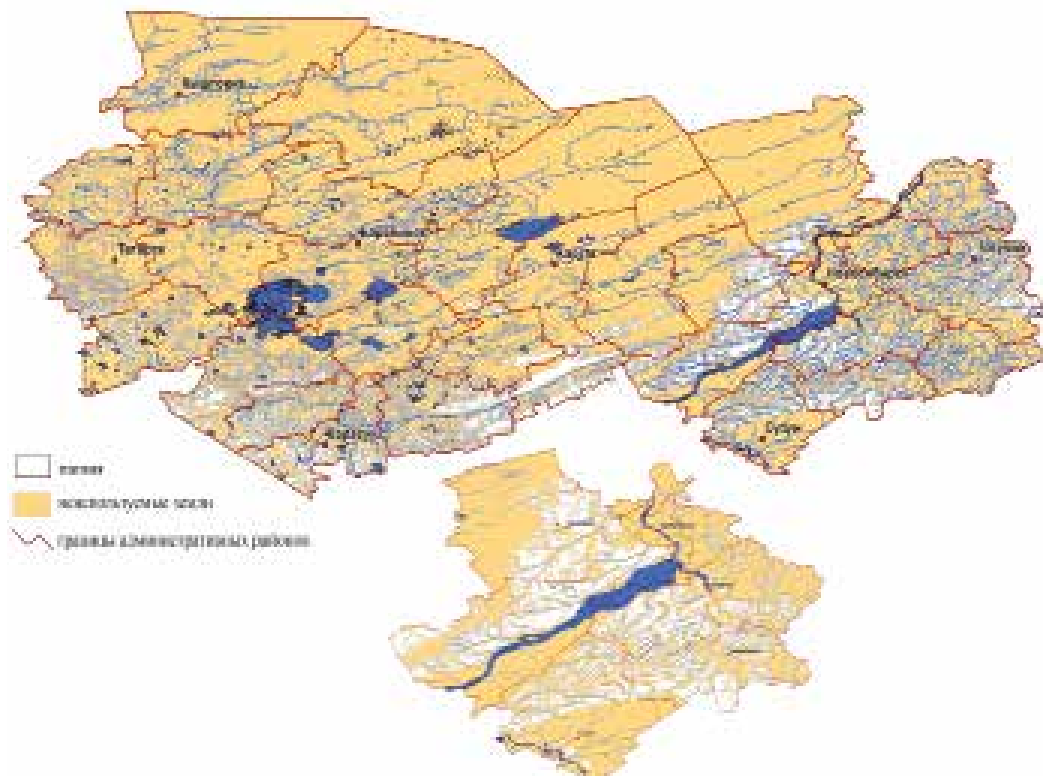


Рис. 2. Маска неиспользуемых земель Новосибирской области и ее увеличенный фрагмент

построена своя маска неиспользуемых земель. На рис. 2 показана маска неиспользуемых земель Новосибирской области и ее увеличенный фрагмент. Для построения масок использовались спутниковые изображения высокого и среднего разрешения с отечественных и зарубежных КА: Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8, Spot-4, «Канопус-В», «Ресурс-П» №1 и «Ресурс-П» №2. Выделенный класс неиспользуемых земель на растровых данных преобразован в векторную форму и вносится в базу данных. С целью выявления изменений в объекте «пашня» (распашка новых земель, зарастания полей) и обеспечения наиболее достоверной

работы алгоритма оценки состояния посевов периодически выполняется обновление созданных масок неиспользуемых земель.

Для выявления общих тенденций изменений индекса вегетации проведены исследования динамики значений NDVI в тестовых хозяйствах, предварительно разделенных на три категории: с хорошим, удовлетворительным и плохим земледелием. Полученной выборки недостаточно для определения точных критериев отнесения NDVI к одной из трех категорий, но можно найти общие тенденции изменений NDVI в течение вегетационного периода. Анализ полученных результатов показал, что чем выше

уровень земледелия в хозяйстве, тем больше изменяются значения NDVI за вегетационный период (больше разница между минимумом и максимумом). Это стало критерием, по которому можно отнести хозяйство к одной из трех категорий на момент окончания вегетационного периода, оценивая уровень земледелия по фактической урожайности. По этому признаку можно классифицировать гораздо больше хозяйств и определять другие критерии для оперативной классификации состояния посевов в течение всего вегетационного периода. По этому принципу были протестированы спутниковые данные с КА Terra за большой период — с 2001 по 2011 год.

Для создания карт оценки состояния посевов используются:

- тематические продукты MOD09GQ и MOD09GA или MYD09GQ и MYD09GA с КА серии EOS, содержащие информацию об отражающей способности поверхности Земли в необходимых для расчета NDVI спектральных каналах, служебную информацию об участках, закрытых облачностью или аэрозолями;
- схемы полей внутривозделушного землеустройства с реперными точками;
- маски неиспользуемых земель.

На основе архива спутниковых данных MOD09 и данных о месте положения рабочих участков полей составим множество съёмов. Съём представляет из себя единичное измеренное значение NDVI в реперной точке участка:

$$T = \{(ndvi, id, doy, year)\},$$

где *ndvi* — измеренное значение NDVI;
id — номер рабочего участка, на котором произведено данное измерение;
doy — день, когда было произведено данное измерение;
year — год, когда произведено данное измерение.

Определим $S(id, year)$ подмножество T следующим образом:

$$S(id, year) \subset T, \\ S(id, year) = \{s \in T \mid s.id=id; s.year=year\},$$

где *s.id* — номер рабочего участка, на котором произведено измерение *s*;
s.year — год, когда было произведено измерение *s*.

Зададим функцию *dif*, определяющую разницу между максимальным и минимальными значениями индекса вегетации на одном рабочем участке за вегетационный период:

$$dif(id, year) = \max(S(id, year).ndvi) - \min(S(id, year).ndvi),$$

где $S(id, year).ndvi$ — множество значений NDVI на рабочем участке с идентификационным номером *id* в год *year*;

min, *max* — соответственно минимальное и максимальное значение в множестве.

Строим три множества характерных значений NDVI за вегетационный период:

$$F(y) = \{t \in T \mid t.year = year; dif(t.id, year) \in Bad\},$$

$$F(y) = \{t \in T \mid t.year = year; dif(t.id, year) \in Normal\},$$

$$F(y) = \{t \in T \mid t.year = year; dif(t.id, year) \in Good\},$$

$$\text{где } Bad = (0,07; 0,375),$$

$$Normal = (0,375; 0,57),$$

$$Good = (0,57; 0,875)$$

Bad, *Normal*, *Good* — эмпирически подобранные интервалы, позволяющие оценить состояние рабочего участка по окончании вегетационного периода.

Множества характерных значений NDVI за все вегетационные периоды объединяются в одно множество для каждой категории земледелия:

$$F_b = \bigcup_{t=2001}^{2011} F_b(t),$$

$$F_n = \bigcup_{t=2001}^{2011} F_n(t),$$

$$F_g = \bigcup_{t=2001}^{2011} F_g(t),$$

На основе трех множеств характерных значений строятся граничные значения NDVI, по которым можно определить состояние посевов в любой день вегетационного периода, а не после его окончания.

Далее на основе спутниковых данных MOD09 строится изображение значений NDVI для всей гранулы, накладываются маски облачности и маски неиспользуемых земель (облачные территории и неиспользуемые земли не учитываются в построении карты). Затем при помощи полученных ранее граничных значений NDVI все оставшиеся точки снимка окрашиваются соответствующим цветом (зеленым, если значение в этой точке попало в интервал, соответствующий хорошему состоянию посевов, желтый — удовлетворительному, красный — плохому). В условных обозначениях указывается процентное соотношение каждой градации оценки состояния посевов. Добавляются векторные слои рек и водоемов, административные границы районов и названия некоторых населенных пунктов (рис. 3).

Алгоритм оценки состояния посевов зерновых культур по спутниковым данным позволяет реализовать пространственно-временной мониторинг состояния посевов как на региональном уровне, так и на уровне отдельных полей. Накопленная информация оценки состояния посевов отражает динамику роста и развития

сельскохозяйственных культур в течение всего периода вегетации.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ ПО ДАННЫМ ДЗЗ И НАЗЕМНЫЕ МАРШРУТНЫЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ

Алгоритм оценки состояния посевов по спутниковым данным позволяет проводить оценку на уровне региона, района и отдельного хозяйства, где оценивается состояние посевов на каждом отдельном поле. Карты оценки посевов создаются на каждую безоблачную дату съема. В табл. 3 приведены результаты оценки состояния посевов по данным ДЗЗ и данным наземных агрометеорологических маршрутных обследований.

Наземные агрометеорологические маршрутные обследования в Новосибирской области проводились в среднем на 150–200 полях в 24 (из 30) административных районах. Оценка состояния посевов по данным ДЗЗ построена таким образом, что на территории, соответствующей объекту «пашня», каждый пиксель спутникового раstra оценивается на пригодность к одной из трех градаций. Тем не менее, процентное соотношение градаций оценки состояния посевов по Новосибирской области в 2012 году по наземным и спутниковым данным практически совпадает. В 2013, 2014, 2015 годах оценка состояния посевов зерновых культур по наземным агрометеорологическим обследованиям полей в хозяйствах и спутниковым данным несколько отличаются: по данным ДЗЗ ниже процент хорошего состояния посевов. Фактическая урожайность зерновых яровых (пшеница, овес, ячмень) в 2013, 2014 и 2015 годах составила соответственно 16, 12 и 14 ц/га — это низкая урожайность даже для климатических условий Сибири. То есть оценка состояния посевов по данным

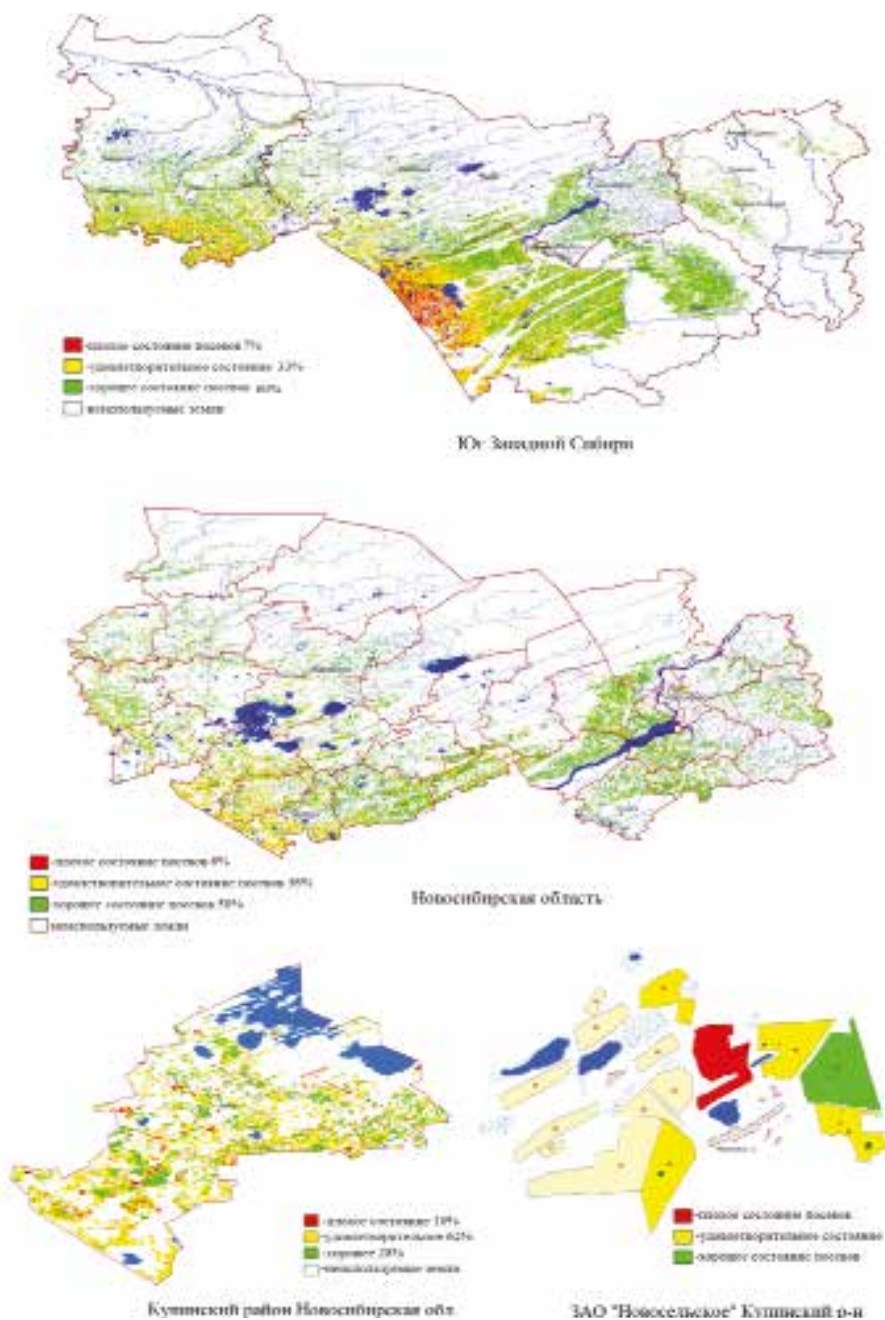


Рис. 3. Карты оценки состояния посевов за 22.06.2015 г. разных уровней детализации: регион, область, район, хозяйство

Оценка состояния посевов, %	2012		2013		2014		2015	
	Наземные обслед.	Данные ДЗЗ	Наземные обслед.	Данные ДЗЗ	Наземные обслед.	Данные ДЗЗ	Наземные обслед.	Данные ДЗЗ
Хорошее	26	24	75	67	56	30	57	40
Удовлетворительное	57	54	24	30	37	65	34	55
Плохое	17	22	1	3	11	5	9	5

Табл. 3. Наземные маршрутные агрометеорологические обследования полей и оценка посевов по данным ДЗЗ в Новосибирской обл.

ДЗЗ не противоречит статистической урожайности зерновых культур.

Конечными продуктами технологии мониторинга состояния посевов являются прогноз урожайности на отдельных полях в хозяйствах, административных районах, областях и карты-схемы оценки состояния посевов (регион, область, административные районы и отдельные хозяйства).

ВЫВОДЫ

Интеграция спутниковых измерений спектральных параметров сельскохозяйственных культур, метеорологических данных, статистической урожайности и космических изображений в единую геоинформационную систему позволила создать технологию оперативного мониторинга состояния посевов на юге Западной Сибири. Использование технологии мониторинга и прогнозирования урожайности зерновых культур позволяет перейти от точечных агрометеорологических наземных обследований полей к площадному мониторингу с детализацией до отдельного поля в течение всего периода вегетации сельскохозяйственных культур.

Технология мониторинга состояния посевов востребована агрометеорологическими службами ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» на территории Омской, Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края, для областных и районных органов государственной

власти, руководителей агрохолдингов, а также для страховых компаний, возмещающих ущерб сельхозпроизводителям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барталев С. А., Лулян Е. А., Нейштадт И. А., Щербенко Е. В. Разработка методов мониторинга пахотных земель России по данным спутниковых наблюдений радиометром Modis. М. ИКИ РАН, 2007, 222 с.
2. Виноградов Б. В. Преобразованная Земля. М. Мысль, 1981, 295 с.
3. Williams J. R. The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC). Technical Reference. US Department of Agriculture. 1997.
4. Брыксин В. М. Применение адаптированной модели биопродуктивности EPIC и космоснимков MODIS для прогнозирования урожайности зерновых культур на территории Западной Сибири. // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии, 2007. — т. 5, вып. 1, с. 20–26.
5. Клещенко А. Д., Вирченко О. В., Савицкая О. В. Спутниковый мониторинг состояния и продуктивности посевов зерновых культур // Труды ВНИИСХМ, 2013. Вып. 38. с. 54–70.
6. Терехов А. Г., Витковская И. С., Батырбаева М. Ж., Спивак Л. Ф. Принципы агроландшафтного районирования пахотных земель Северного Казахстана по данным LANDSAT и MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010. — т. 7. № 3. с. 292–304.