

УДК 528.88

А.В. Евтюшкин, В.Н. Юшаков, Н.В. Рычкова

# Использование данных дистанционного зондирования для распознавания зерновых культур и коррекции моделей биопродуктивности

**Анализ многовременных изображений с помощью цветового многовременного синтеза.** В качестве исходных изображений использовались изображения со сканеров МСУ-Э и МСУ-СК. Все изображения проходили геопривязку по опорным точкам в системе ArcView и интегрировались в ГИС в единой системе координат. Это позволяло строить многовременные изображения и рассчитывать в ГИС по вышеуказанным изображениям средние значения по каналам и  $NKVI$  внутри полигонов. Для проведения экспресс-дешифрирования производилось синтезирование по каналам R, G, B изображений ИК каналов сканеров МСУ-Э и МСУ-СК или индексов  $NKVI$  за различные даты, которые производились в системе ENVI, что позволяет достаточно точно распознать все виды пропашных культур. По результатам дешифрирования и наземных измерений уточнялось размещение пропашных сельскохозяйственных культур на полях тестовых хозяйств в том числе и в полевых условиях.

Сканерные цифровые изображения принимались приемной антенной ЗапСибРЦПОДАа в Новосибирске, и это позволяло оперативно использовать в полевых условиях предварительные результаты цветового синтезирования на 3–4 день после съемки. При этом уточнялись тестовые поля и варьировался план проведения наземных измерений.

**Построение и анализ кривой фазового развития основных культур.** Особенности динамики развития сельскохозяйственных культур хорошо иллюстрируются построением кривых фазового развития в многомерном признаковом пространстве при многократных последовательных измерениях в течение вегетационного периода. Для построения кривых фазового развития в 1998–2000 гг. были проведены наземные измерения группы полей мультиспектральным радиометром MSR16, который измеряет коэффициенты спектрального отражения в 16 различных каналах от 460 до 1650 нм с шириной канала от 10 до 200 нм. Кривые фазового развития (рис. 1, 2) представляют собой множество точек в пространстве спектральных коэффициентов яркости, измеряемых в течение одного сезона для какой-либо культуры. Для удобства представления обычно рас-

сматриваются проекции на плоскость, заданную для двух спектральных интервалов.

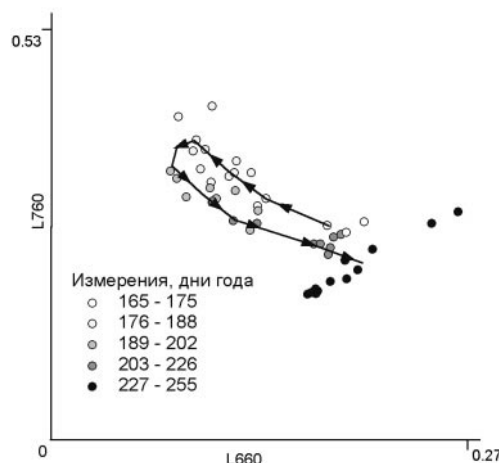


Рис 1. Фазовая кривая пшеницы (поздние сроки сева) с нанесенными измеренными значениями СКЯ

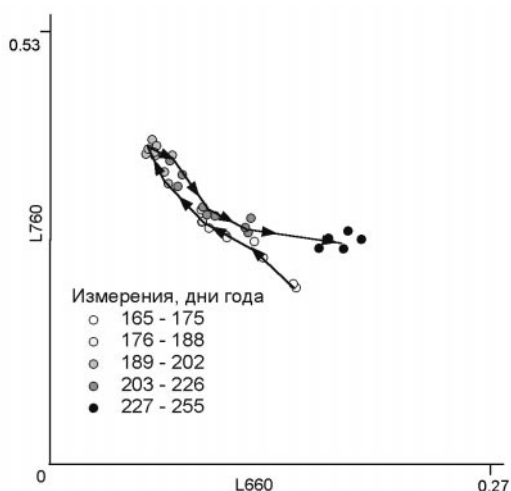


Рис 2. Фазовая кривая просо с нанесенными измеренными значениями СКЯ

В многомерном спектральном признаковом пространстве каждый вид культур в определенные сроки и в определенной фазе развития образует компактный кластер. Ход кривой фазового развития образует петлю, начало и окончание которой находится в области, соответствующей области открытых почв. Для выбора пар спектральных интервалов был проведен расчет качества разбиения зерновых культур по кривым фазового развития. Для этого в качестве критерия использовалось нормированное весовое расстояние, измеряемое

по принципу «средней связи» между классами [1]. Расстояние определяется как арифметическое среднее всевозможных парных расстояний между измерениями рассматриваемых видов культур. Расстояние нормируется на парные расстояния внутри одного вида культур.

$$K = \frac{r(A, B)}{\sqrt{r(A, A)r(B, B)}} - 1$$

$$r(A, B) = \frac{\sum_{a \in A, b \in B} d(a, b)w(a, b)}{\sum_{a \in A, b \in B} w(a, b)}$$

где  $d(a, b)$  – расстояние между двумя измерениями в пространстве спектральных коэффициентов яркости. Весовой коэффициент  $w$  вводился для учета параметрической зависимости кривой фазового развития от времени  $t$ , выражаемого в днях:

$w(a, b) = k - |t(a) - t(b)|$ , если  $w < 1$  то  $w = 1$ , где  $k$  – параметр весовой функции. На основании полевых измерений построена таблица влияния выбора осей  $X$  и  $Y$  и параметра  $k$  для построения фазовой кривой на возможность разделения зерновых культур.

В таблицах приведены значения для пар каналов с наибольшими значениями коэффициента качества.

Таким образом, наилучшего разбиения можно добиться для пар овес/кукуруза на каналах L610/L855 для параметра  $k = 15$ . Значение  $k = 15$  означает сравнение культур в рамках двухнедельного интервала, что объясняется примерной продолжительностью одной вегетативной фазы.

Для максимальных значений критерия качества разбиения выбраны пары спектральных интервалов (L610/L855, L610/L830, L610/L760), по которым производится лучшее разбиение видов зерновых культур. На приведенном рисунке 3 показаны фазовые кривые для различных культур с нанесенными значениями измерений коэффициента отражения пшеницы на тестовом поле.

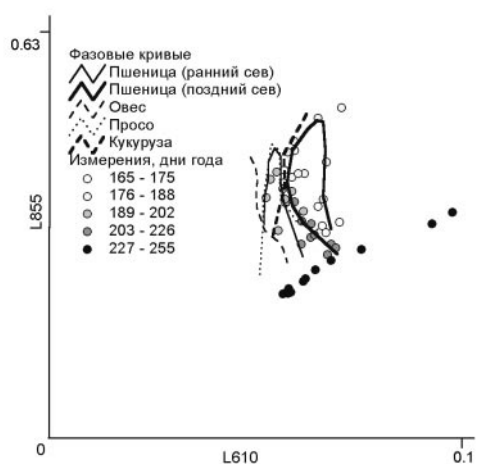


Рис. 3. Фазовые кривые зерновых культур со значениями СКЯ пшеницы (поздние сроки сева)

Таблица 1

Коэффициенты качества разделения зерновых культур для  $k = 1$   
(нет параметрической зависимости)

L1	L2	Пшеница/ просо	Пшеница/ овес	Просо/ овес	Овес/ кукуруза	Просо/ кукуруза	Пшеница/ кукуруза	Среднее
L610	L855	0,065	0,041	0,103	0,619	0,251	0,450	0,255
L610	L830	0,061	0,042	0,098	0,568	0,231	0,406	0,235
L610	L760	0,064	0,038	0,092	0,549	0,223	0,420	0,231

Таблица 2

Коэффициенты качества разделения зерновых культур для  $k=15$

L1	L2	Пшеница/ просо	Пшеница/ овес	Просо/ овес	Овес/ кукуруза	Просо/ кукуруза	Пшеница/ кукуруза	Среднее
L610	L855	0,672	0,133	1,065	1,439	0,672	0,734	0,786
L610	L830	0,678	0,132	1,031	1,339	0,626	0,686	0,749
L610	L760	0,716	0,122	1,049	1,274	0,569	0,694	0,738
L560	L855	0,655	0,137	1,027	1,286	0,602	0,679	0,732

Эти исследования позволяют выбрать те спектральные диапазоны, которые необходимо использовать при дистанционном измерении биомассы и производить разделение сельскохозяйственных культур, основываясь на закономерностях их фазовых траекторий.

**Использование модели биопродуктивности.** Для прогнозирования урожайности зерновых культур применяются модели биопродуктивности [2, 3]. Автором было проведено тестирование модели EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), разработанной Kr. Williams [4]. Данная модель, используя минимальное число входных параметров, позволяет вычислять основные параметры растительности (биомассу, высоту, листовой индекс и т.д.) на каждый день, что позволяет сравнивать их с данными наземных измерений и данными дистанционного зондирования. Поскольку эксперимент проводился в западной части Алтайского края в засушливой, умеренно-засушливой и недостаточно увлажненной зоне, был использован двухкомпонентный вариант модели с расчетом влагообмена в почве, так как существенными параметрами для роста «модели» яровой пшеницы являются сроки сева, начальная влажность и гидрологические параметры почвы [5]. В то же время такие параметры, как процент гумуса, и другие для данной зоны Алтайского края не являются существенными.

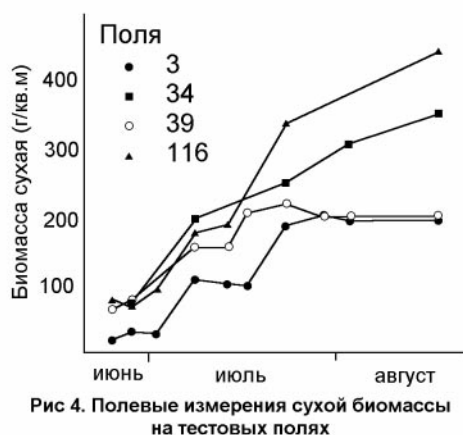


Рис. 4. Полевые измерения сухой биомассы на тестовых полях

Для тестирования модели на локальном уровне в полевых сезонах 1998–2001 гг. проводились наблюдения на ряде полей Ключевского района Алтайского края. Для получения необходимых для модели метеоданных была установлена стационарная метеостанция Campbell CM6, которая с 15-минутным интервалом производила измерения температуры воздуха, почвы, осадков, влажности воздуха, влажности почвы, скорости ветра и солнечной радиации. За развитием пшеницы на наблюдаемых

полях в течение вегетационного периода, с мая по сентябрь, проводился визуальный и инструментальный контроль. Помимо основных биометрических показателей, таких как высота культур, биомасса (рис. 4) еженедельно производилось измерение листового индекса с помощью прибора LAI-2000 и измерение спектрального коэффициента отражения в 16 диапазонах мультиспектральным радиометром MSR-16. Время измерений также согласовывалось с расписанием витков спутника «Ресурс-01№03». Результаты измерений сохранялись в базах данных и интегрировались в ГИС.

Для анализа взаимосвязей между результатами дистанционного зондирования и биометрическими показателями производилось усреднение значений, полученных в пределах контуров полей по снимкам МСУ-Э и МСУ-СК. С учетом того, что типичный размер полей в равнинной части Алтайского края составляет 0,5 на 2–5 км, при разрешении сканера МСУ-Э 30–40 м, получается выборка до 2 тыс. точек, а для сканера МСУ-СК с разрешением 150 м, получается выборка до 100 точек. Это дает очень хорошее статистическое основание для измерений в сравнении с размером выборки, которая может быть получена из наземных измерений. Практически такой же статистический объем путем наземных измерений получить невозможно. По данным МСУ-Э/МСУ-СК вычислялся нормализованный вегетационный индекс (NKVI), который позволяет уменьшить влияние условий съемки в разные периоды времени. Наибольший коэффициент корреляции достигается между NKVI и сухой биомассой растительности [6].

Сухая биомасса является важнейшим параметром в моделях роста растений. Это позволяет в пределах агроклиматического сезона производить интерполяцию значений биомассы по данным дистанционного зондирования. Таким образом, данные космического дистанционного зондирования могут повысить точность измерения биометрических показателей и позволяют интерполировать их значения на поля, не охваченные наземными измерениями, что дает дополнительную информацию для тестирования моделей.

**Определение сроков сева.** Для начала был проведен вычислительный эксперимент по определению влияния сроков сева для известных уже метеорологических условий. Для засушливой зоны Кулундинской степи, в которой и проводились тестовые эксперименты, Кулундинской СХОС рекомендуется сев в третьей декаде мая [7]. В то же время, как показыва-

ет практика, сроки сева зерновых культур очень часто не выдерживаются и сев продолжается нередко и в начале июня, что кардинальным образом сказывается на урожайности. Это порождает задачу определения реальных сроков сева зерновых культур. Для чего предлагается использование данных дистанционного зондирования. Проводившиеся ранее эксперименты [8] по определению сроков сева заключались в наблюдении дистанционными методами процента обработанных площадей непосредственно в период проведения сева. Для вычисления даты сева это требовало бы ежедневные съемки в течение 3–4 недель.

Для определения сроков сева при известных погодных условиях и наличии двух-трех изображений МСУ-СК в середине периода вегетации, по которым по описанной выше методике было вычислено регрессионное значение биомассы для каждого поля за указанные даты съемок, предлагается другой подход.

Для этого производилось моделирование развития пшеницы для разных дат сева от 1 мая до 7 июня и фиксированным метеоданным, и выбраны кривые со значениями биомассы, наиболее близкими к значениям, полученным дистанционным путем.

Поле	Дата сева	Дата сева (по модели)
3	29.05.99	2.06.99
34	25.05.99	24.05.99
121	25.05.99	25.05.99
154	24.05.99	21.05.99
168	18.05.99	15.05.99
39	18.05.99	15.05.99
116	26.05.99	24.05.99

Таким образом, данная методика позволяет восстанавливать значения дат сева по 2–4 съемкам территории в период вегетации пшеницы с точностью до 2 дней. При этом нет необходимости производить серию съемок только для определения сроков сева, а полученные с помощью этих же съемок изображения могут быть использованы и для получения другой информации.

**Коррекция модели по данным дистанционного зондирования.** После определения сроков сева производилось моделирование ро-

ста пшеницы до периода ее полного созревания, поскольку дистанционными методами возможно точное измерения биомассы только в зеленой фазе, до ее созревания. Для этого в модель закладывались известные метео- и почвенные данные и сроки сева. Исследования показали, что точность восстановления биомассы недостаточна для прогнозирования урожайности. Это объясняется следующими факторами: недостаточной точностью самой модели, неопределенностью многих, в том числе и метеорологических параметров, поскольку в Алтайском крае имеется недостаточная густота сети метеостанций.

Для преодоления данных неопределенностей по имеющимся уже изображениям была произведена коррекция модели в середине вегетационного сезона. Кривые развития пшеницы на тестовых полях с коррекцией и без коррекции и измеренные в полевых условиях значения биомассы показаны на рисунке 5. Использование данных дистанционного зондирования повышает точность использования модели биопродуктивности.

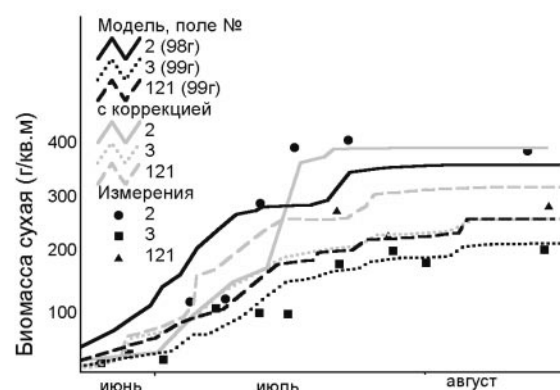


Рис 5. Результаты моделирования развития пшеницы на тестовых полях, в т.ч. с коррекцией по ДДЗ.

**Закключение.** Использование цветного синтеза многовременных сканерных изображений позволяет производить предварительное дешифрирование сельскохозяйственных культур. Использование пары каналов 610 и 855 нм оптимально для разделения зерновых культур по фазовым траекториям. По нескольким сканерным изображениям в середине вегетационного периода с использованием модели биопродуктивности возможно определение сроков сева пшеницы. Коррекция модели по данным изображениям позволяет повысить точность восстановления биомассы.

## Литература

1. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М., 1989.
2. Моделирование продуктивности агроэкосистем / Н.Ф. Бондаренко, Е.Е. Жуковский, И.Г. Мутнин, С.В. Нерпин, Р.А. Полуэктов, И.В. Усков. Л., 1982.
3. Хворова Л.А., Журавлева В.В., Плинокосова Л.Н., Гриценко А.А. Результаты анализа и компьютерного тестирования блоков радиации и фотосинтеза // Известия АГУ. 2001. №1.
4. Williams J.R. The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC). Technical Reference. US Department of Agriculture. 1997.
5. Коробейников Н.И. Влияние метеофакторов на признаки продуктивности и урожайность мягкой яровой пшеницы в условиях Приобья Алтайского края // Проблемы селекции и семеноводства полевых культур в Западной Сибири и Казахстане. Барнаул, 2001.
6. Байкалова Т.В., Евтюшкин А.В., Миронов В.Л., Рычкова Н.В., Юшаков В.Н. Использование ГИС и данных дистанционного зондирования для оценки урожайности яровой пшеницы в Алтайском крае // Интеркарто-6: ГИС для устойчивого развития территорий: Мат. Междунар. конф. Апатиты, 2000. Т. 2.
7. Возделывание основных сельскохозяйственных культур в засушливой зоне Кулундинской степи: методические рекомендации / И.Г. Иванков и др. Новосибирск, 1984.
8. Андреев Г.Г., Бочаров В.П., Сазонов Н.В., Чабан Л.Н. Автоматизация тематической обработки космических изображений при оценке состояния сельскохозяйственных культур // Исследования Земли из космоса. 1986. №5.

