

В.М. Брыксин, А.В. Евтюшкин, Н.В. Рычкова

Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и моделирования биопродуктивности

V.M. Bryksin, A.V. Yevtyushkin, N.V. Rychkova

Forecasting of Grain Crops Productivity on Basis of the Remote Sounding Data and Bio-productivity Modeling

Предлагается использование модифицированной модели биопродуктивности EPIC для прогнозирования урожайности зерновых культур. Внесены изменения в блоки входных данных по солнечной радиации и тепловому режиму почвы. Коррекция листового индекса LAI в пошаговой модели EPIC выполняется по космоснимкам или данным наземных измерений на определенные даты развития растений в период прогнозирования биологической урожайности. Технология позволяет прогнозировать сроки биологического созревания основных яровых зерновых культур и оптимальные сроки начала уборки. Прогноз урожайности выдается за месяц до начала уборки с точностью до 1–2 ц/га.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, листовый индекс, вегетационный индекс, урожайность, моделирование, метеоданные.

Введение. В аграрном производстве и при государственном управлении АПК особую актуальность имеет задача поэтапной оценки и уточнения урожайности зерновых культур и валовых сборов как в разрезе отдельных предприятий, так и на уровне территорий субъектов РФ. Несмотря на важность проблемы, для осуществления прогноза в основном все еще используются традиционные приемы оценки агроклиматических ресурсов и районирования территорий с помощью комплексных агроклиматических показателей. Выходом из сложившейся ситуации может служить применение имитационной модели биопродуктивности EPIC [1] в совокупности с данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), что позволяет осуществлять оценку урожайности без проведения дорогостоящих полевых измерений на больших площадях.

Модификация модели биопродуктивности EPIC. В модели EPIC фенологическое развитие культуры основывается на сумме эффективных температур. Потенциальное ежедневное изменение сухой биомассы ΔB_p зависит от листового индекса LAI и солнечной радиации RA:

$$\Delta B_p = 0.0005 \cdot BE \cdot RA \cdot (1 - e^{-0.65 \cdot LAI}),$$

It is offered to use the EPIC bio-productivity updated model for forecasting grain crops productivity. Input data blocks are changed according to solar radiation and soil temperature. Correction of LAI leaf index in step-by-step EPIC model is fulfilled basing on space images or on the results of soil measurements for certain time of plants development in forecasting periods of biological productivity. The technology allows us to predict periods of biological maturing of the main summer grain crops and optimal periods of the beginning of harvesting. The productivity forecast is produced a month before the beginning of harvesting to within 1–2 center/hectare.

Key words: remote sensing, LAI, NDVI, crop productivity, modeling, whether data.

где BE – коэффициент преобразования энергии в биомассу.

Моделирование приращения листового индекса LAI разделено на два этапа: от появления листьев до начала увядания и от начала увядания до конца сельскохозяйственного сезона.

Урожайность YLD рассчитывается пропорционально итоговой сухой биомассе BIOM:

$$YLD = HI \cdot \max(BIOM),$$

где HI – индекс урожайности.

В ходе тестирования модели были выявлены некоторые существенные недостатки [2]. В частности, в модели присутствует существенное число метеорологических и почвенных характеристик, которые в России не измеряются. Блоки радиации, температуры почвы и азотного баланса реагируют неадекватно. С другой стороны, к основным можно отнести всего шесть метеорологических характеристик (максимальная и минимальная температура воздуха, приходящая солнечная радиация, количество осадков, относительная влажность и скорость ветра), которые полностью или частично измеряются на российских метеостанциях. Из вышесказанного можно сделать вывод о целесообразности примене-

ния модели EPIC после проведения ее адаптации к условиям Западной Сибири.

При анализе данных, предоставленных Западно-Сибирским управлением гидрометслужбы, выявлено, что приходящая солнечная радиация не измеряется на большинстве метеостанций РФ, а блок радиации в модели EPIC позволяет найти только максимальную суммарную приходящую радиацию. Поэтому было принято решение заменить блок радиации в модели EPIC [2, 3].

Для расчета суточного хода приходящей солнечной радиации предлагается воспользоваться формулой Т.Г. Берлянд, используемой в модели радиационного режима АФИ РАСХН [4]:

$$Q_0 = \frac{S_0 \sin h_s}{1 + f \cdot \operatorname{cosec} h_s},$$

где $S_0 = 1,98 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$ – солнечная постоянная; f – коэффициент, зависящий от географической зоны и времени года; h_s – высота Солнца.

Суммарная интенсивность радиации на уровне земли зависит от высоты Солнца, прозрачности атмосферы, степени облачности, продолжительности солнечного сияния. Так как в предоставляемых гидрометслужбой данных отсутствуют продолжительность солнечного сияния и облачность, то для учета этих факторов предлагается использовать расчет приходящей солнечной радиации Q через относительную влажность воздуха:

$Q = -1.318 \cdot \omega \cdot Q_0 + 0.922 \cdot \omega + 1.357 \cdot Q_0 + 1.012$ – для мая;

$Q = -1.448 \cdot \omega \cdot Q_0 - 0.035 \cdot \omega + 1.682 \cdot Q_0 + 0.077$ – для июня–августа,

где ω – относительная влажность воздуха.

При расчете предполагалось, что даже при наличии сплошной облачности определенный процент радиации достигает поверхности почвы.

При анализе блока температурного стресса модели EPIC было выявлено, что он неадекватно реагирует на изменение температуры почвы (заморозки и перегревание) [5]. Таким образом, возникла проблема модификации блока расчета температуры почвы, зависящей от минимального числа параметров.

По экспериментальным данным была установлена зависимость между максимальной температурой почвы, максимальной температурой воздуха и суммарной приходящей солнечной радиацией, наблюдаемыми в течение дня, которую предлагается использовать для расчетов:

$$T_{p,\max} = 1.2784 \cdot T_{v,\max} + 0.4499 \cdot Q + 0.4744,$$

где $T_{p,\max}$ – максимальная температура на поверхности почвы; $T_{v,\max}$ – максимальная температура воздуха.

Погрешность расчетов составляет 10,75%.

В ночное время наблюдается взаимосвязь между минимальной температурой почвы и эффективным

излучением. Исходя из данного факта получено соотношение, которое предлагается для проведения расчетов минимальной температуры почвы:

$$T_{p,\min} = 0.8024 \cdot T_{v,\min} + 1.4789 \cdot E + 4.6385,$$

где $T_{p,\min}$ – минимальная температура на поверхности почвы; $T_{v,\min}$ – минимальная температура воздуха; E – эффективное излучение.

Для расчета эффективного излучения использовалась двухпоточковая модель длинноволновой радиации. Погрешность расчетов составляет 9,76%.

Для моделирования роста сельскохозяйственных культур был создан программный комплекс SDIM (System of Databases and Imitating Modelling), включающий в себя базу данных, модуль приведения данных к формату моделей, сами модели и модуль отображения результатов моделирования (рис. 1). Применяя комплекс SDIM, были проведены корректировка и настройка модели биопродуктивности EPIC для Алтайского края и Новосибирской области на основе метеоданных и данных о фактической урожайности за 1985–2005 гг., предоставленных ЗапСибРЦПОД в рамках научного сотрудничества.

Подспутниковые наблюдения и тестирование модели EPIC на локальном уровне. Полевые измерения спектральных и биометрических характеристик посевов яровой пшеницы проводились на тестовых полях Ключевского района Алтайского края в 1998–2003 гг. [6–8]. Ежедневно производились измерения листового индекса с помощью прибора LAI-2000 и спектрального коэффициента отражения в 16 каналах мультиспектральным радиометром MSR-16. После измерений пшеница срезалась с площадки размером 1×1 м и определялись средняя высота растений, сырая и сухая биомасса. Время полевых измерений также согласовывалось с пролетом спутников Ресурс-01 и TERRA над заданной территорией. Метеоданные для модели EPIC поступали с метеостанции Campbell CM6, установленной в 10 км от тестовых полей Кулундинской опытной станции РАСХН [6]. Автоматически с интервалом осреднения 15 минут выполнялись измерения температуры воздуха, почвы, осадков, влажности воздуха и почвы, скорости ветра, солнечной радиации.

На рисунке 2 приведен пример моделирования развития пшеницы на одном из тестовых полей в 1999 г. На графике также нанесены полевые измерения сухой биомассы надземной части и регрессионная оценка по данным сканера МСУ-СК, установленного на спутнике «Ресурс-01». Модельная урожайность в течение 1998–2002 гг. на полях, находящихся в радиусе до 20 км от метеостанции CM6, совпадала с реальной с точностью 2 ц/га. Вариации фактической урожайности существенно зависят от сроков сева и выпадения локальных осадков над отдельными полями.

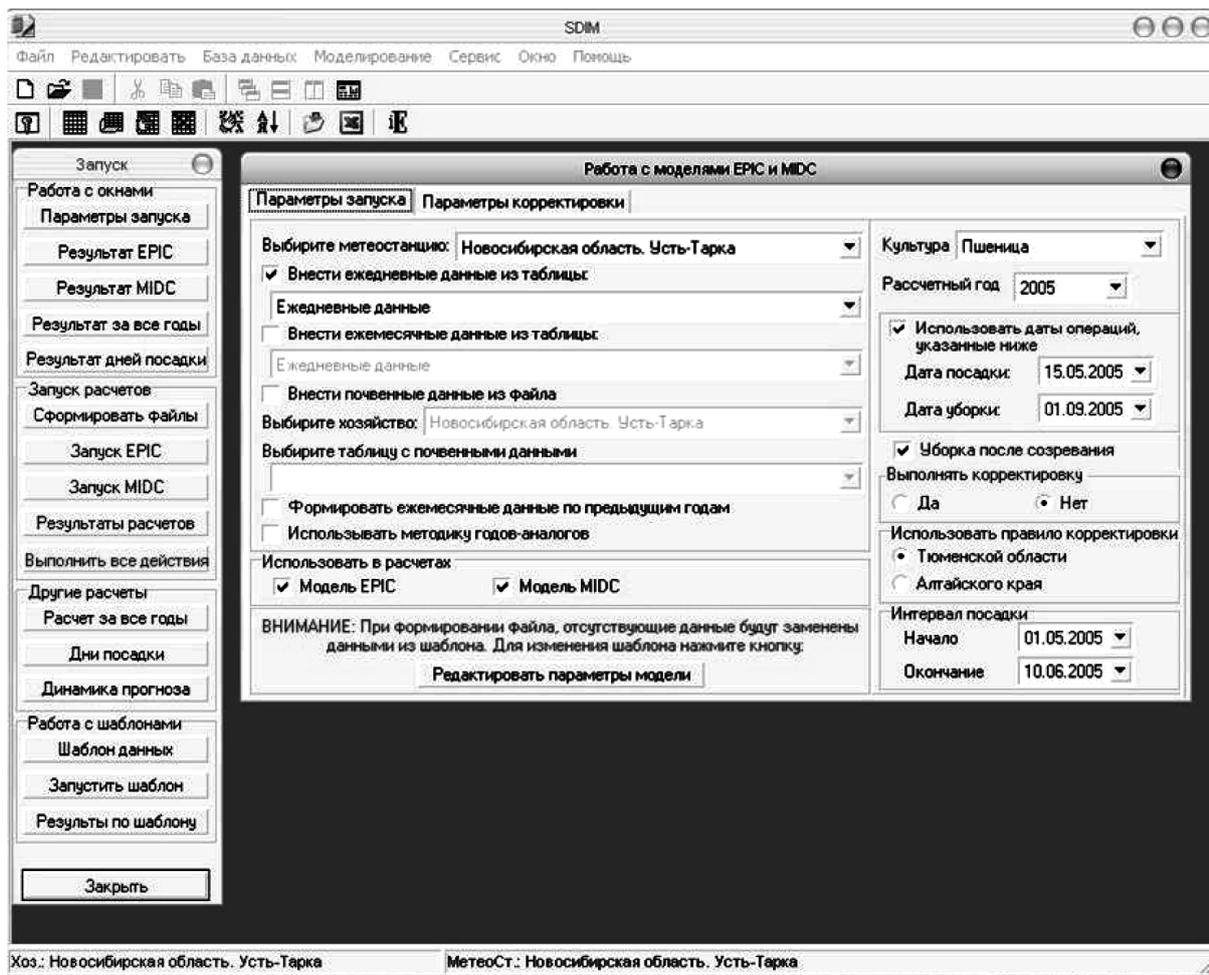


Рис. 1. Программный комплекс SDIM

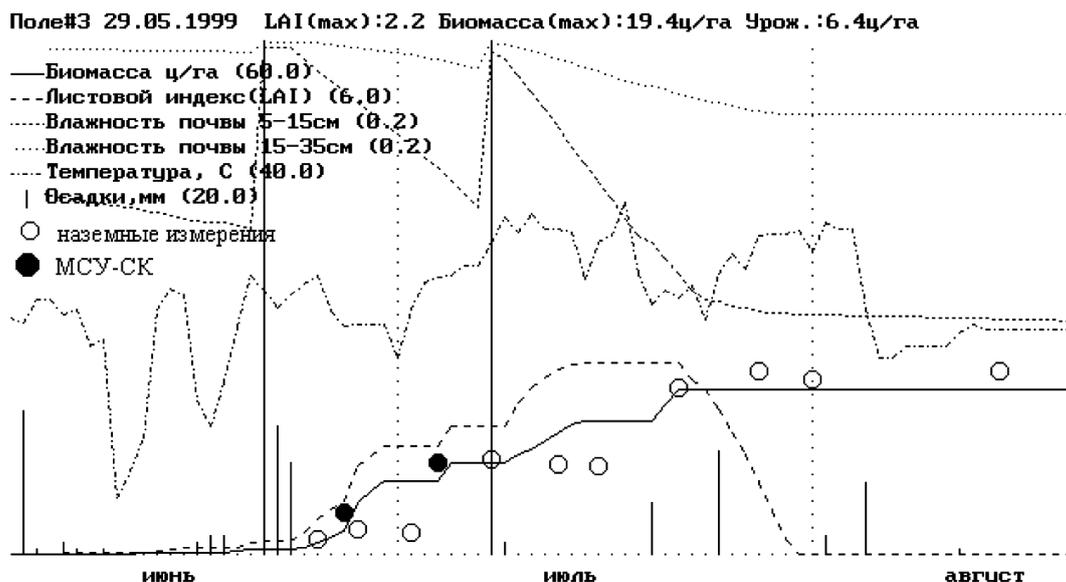


Рис. 2. Моделирование развития яровой пшеницы сорта Алтайская-50 на тестовом поле. Дата сева 29.05.1999

Также проведено моделирование урожайности для 20 административных районов Алтайского края по метеоданным за 1994–1998 гг. После проведения моделирования с коррекцией листового индекса по данным МСУ-СК коэффициент корреляции с 0,7 возрастает до 0,85, а отклонение уменьшается с 1,65 до 1,3 ц/га (рис. 3). Таким образом, использование данных дистанционного зондирования повышает точность моделирования урожайности.

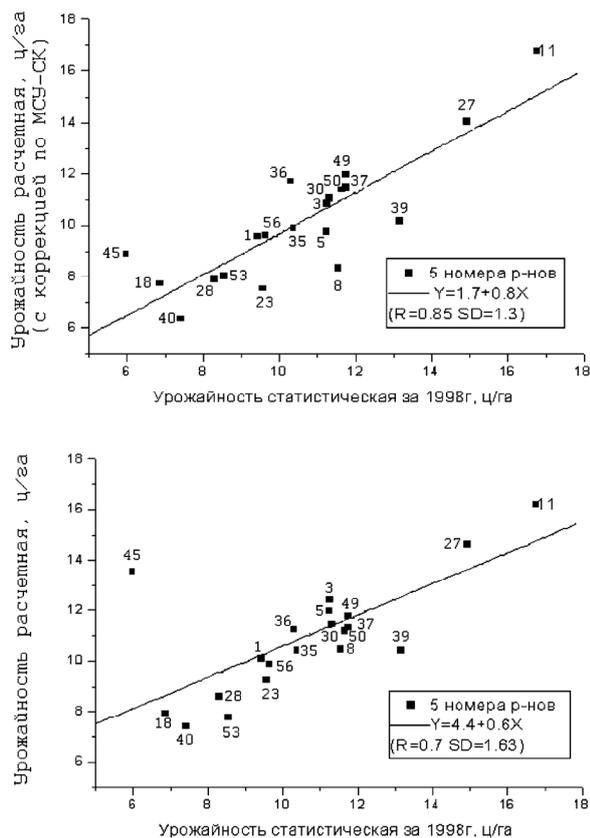


Рис. 3. Сравнение статистических и расчетных урожайностей по районам Алтайского края за 1998 г. без коррекции и с коррекцией по данным сканера МСУ-СК

Прогнозирование урожайности зерновых на региональном уровне. Модель EPIC является непрерывной имитационной моделью развития растений блочного типа. Она позволяет рассчитывать основные параметры культуры (биомассу, листовый индекс, высоту растения и др.) на каждый день и сравнивать их с данными наземных измерений и ДЗЗ, а в случае необходимости производить корректуру.

В модели EPIC листовый индекс LAI для различных стадий развития культуры представлен как функция суммы эффективных температур и стрессов [1]. От появления до начала увядания листьев LAI оценивается по формуле

$$LAI_j = LAI_{j-1} + \Delta LAI,$$

где j – день расчета.

Выполненные исследования показали, что накапливаются ошибки расчета биомассы при вычислении по модели EPIC только на основе метеопараметров. Это объясняется следующими факторами: недостаточная точность самой модели, неопределенность многих, в том числе метео- и почвенных параметров, отдельные из них не измеряются в России. Для повышения точности прогнозирования урожайности предлагается выполнять замену листового индекса на день расчета по модели на листовый индекс LAI , вычисленный для данной территории по спутниковому изображению [6, 7]. Дальнейший расчет листового индекса после дня коррекции выполняется с использованием ежедневных метеорологических параметров по модели биопродуктивности. Корректировку по космоснимкам необходимо проводить 3–4 раза до достижения LAI максимального значения [3].

Для отработки технологии прогнозирования урожайности зерновых культур на юге Западной Сибири разработано программное обеспечение на языке IDL для расчета листового индекса LAI на основе данных сканера MODIS на базе суперкомпьютера SUN Fire15K в потоковом режиме [9]. Данные сканера MODIS со спутников TERRA и AQUA оперативно принимаются в Центре ДЗЗ ЮНИИ ИТ. По космоснимкам MODIS на основе алгоритмов MOD13 и MOD15 рассчитываются вегетационный индекс $NDVI$ и листовый индекс LAI . Для тестовых полей рассчитывался осредненный листовый индекс LAI в границах каждого поля.

Результаты расчетов урожайности по модифицированной модели и статистические данные отчетности в ходе уборки яровой пшеницы для районов юга Тюменской области представлены на рисунке 4. При этом использовались ежедневные метеоданные, предоставляемые Тюменским ЦГМС в период с 1 мая по 31 августа 2004 г.

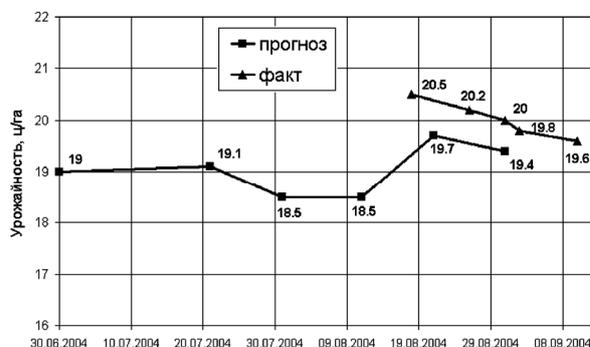


Рис. 4. Динамика прогнозируемой и фактической урожайности яровой пшеницы во время уборки в Тюменской области

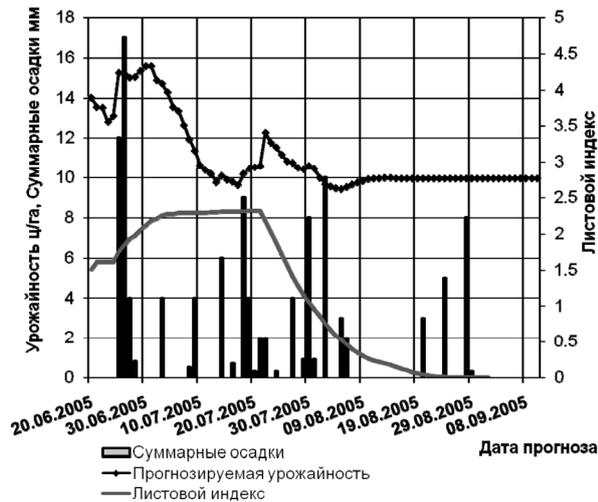


Рис. 5. Динамика прогнозируемой урожайности в сравнении с листовым индексом и осадками для метеостанции Здвинск Новосибирской области

Рисунок 5 отражает динамику прогнозируемой урожайности в вегетационный период в зависимости от фактических метеоусловий. На диаграмме видно, что колебания в расчетных значениях биологической урожайности яровой пшеницы становятся минимальными в конце июля. Это подтверждает возможность прогноза урожайности яровой пшеницы за месяц до начала уборки на юге Западной Сибири.

Заключение. Тестирование модели с контрольными полевыми измерениями в 1998–2007 гг. показало, что использование математических моделей развития растений совместно с данными ДЗЗ позволяет прогнозировать урожайность яровой пшеницы в разрезе каждого поля с точностью 1–2 ц/га. Применение данной методики перспективно для оценки урожайности и валовых сборов в интересах органов государственной власти, банковских структур, предоставляющих кредиты, и страховых компаний, возмещающих ущерб сельхозпроизводителям в связи с потерями урожая.

Библиографический список

1. Williams J.R. The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC). Technical Reference / US Department of Agriculture, 1997.
2. Брыксин В.М., Евтюшкин А.В. Использование модели биопродуктивности EPIC и космоснимков MODIS для прогнозирования урожайности зерновых культур // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: сб. науч. ст. – М., 2007. – Т. II, вып. 4.
3. Евтюшкин А.В., Брыксин В.М., Рычкова Н.В. Способ прогнозирования урожайности зерновых культур на основе данных космического мониторинга и моделирования биопродуктивности: патент РФ №2379879 // Бюл. №3. Заявка №2007125088/12, 02.07.2007. Опубл. 27.01.2010.
4. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л., 1984.
5. Брыксин В.М. Применение адаптированной модели биопродуктивности EPIC и космоснимков MODIS для прогнозирования урожайности зерновых культур на территории Западной Сибири // Вестник НГУ. Сер.: Информационные технологии. – 2007. – Т. 5, вып. 2.
6. Байкалова Т.В., Евтюшкин А.В., Миронов В.Л., Рычкова Н.В., Юшаков В.Н. Использование модели биопродуктивности EPIC и сканерных космических изображений для прогнозирования урожайности пшеницы на региональном уровне // Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях: тр. III междунар. конф. – Минск, 2002.
7. Евтюшкин А.В., Рычкова Н.В., Юшаков В.Н. Использование данных дистанционного зондирования для распознавания зерновых культур и коррекции моделей // Известия АлтГУ. – 2002. – №1.
8. Евтюшкин А.В., Рычкова Н.В. Изучение динамики вегетационного индекса сельскохозяйственной зоны Западной Сибири по данным NOAA и спутниковых полигонных измерений // Информационные технологии и космический мониторинг: мат. 3-й науч.-практ. конф. – Ханты-Мансийск, 2004.
9. Евтюшкин А.В., Еремеев А.В., Макеева М.А. Оперативная тематическая обработка данных дистанционного зондирования на распределенных вычислительных ресурсах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – №6.