

Использование модели биопродуктивности EPIC и космоснимков MODIS для прогнозирования урожайности зерновых культур

В.М. Брыксин, А.В. Евтюшкин

Югорский НИИ информационных технологий (ЮНИИ ИТ)

628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Мура, 151

E-mail: avy@uriit.ru

Предлагается использование модифицированной модели биопродуктивности EPIC для прогнозирования урожайности яровых зерновых культур в разрезе районов и субъектов федерации. Внесены изменения в блоки входных данных по солнечной радиации и теплового режима почвы. Коррекция листового индекса LAI в пошаговой модели EPIC выполняется по космоснимкам среднего разрешения 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.

Введение

За последний год проблема развития сельского хозяйства в России вышла на передний план. Это связано с реализацией Национального проекта развития агропромышленного комплекса. В связи с этим дотационные бюджетные и коммерческие вливания в отрасль возросли в несколько раз. В данной ситуации особенно актуальной становится задача поэтапной оценки и уточнения урожайности зерновых культур, как в разрезе отдельных хозяйств, так и на уровне административных районов и субъектов РФ. Заблаговременный прогноз урожайности используется как коммерческими, для оценки кредитоспособности сельхозпроизводителя в рамках кредитования под будущий урожай, так и государственными структурами, для контроля над не целевым использованием дотационных средств. Не смотря на важность проблемы, для осуществления прогноза, в основном, все еще используются традиционные приемы оценки агроклиматических ресурсов и районирования территорий с помощью комплексных агроклиматических показателей, что связано с существенными материальными и временными затратами [1]. Ситуация осложняется еще и тем, что в период недофинансирования произошло ухудшение экологического состояния сельскохозяйственных земель, вызванное существенными нарушениями агротехники возделывания, наблюдавшимися в 90-е годы прошлого века, что приводит к уменьшению продуктивности сельскохозяйственных культур.

Практически оперативную оценку и мониторинг биопродуктивности зерновых культур с достаточно высокой точностью можно осуществлять используя 6 основных метеорологических характеристик (максимальная и минимальная температура воздуха, проходящая солнечная радиация, количество осадков, относительная влажность и скорость ветра), которые измеряются на российских метеостанциях и космические сканерные изображения среднего разрешения.

Адаптация модели биопродуктивности

Использование имитационных моделей биопродуктивности могло бы служить решением данной проблемы, однако, настройка моделей и последующая корректировка по фактическим данным, требует существенных материальных и временных затрат [1]. Использование только данных дистанционного зондирования существенно снижает производственные затраты, но, как было показано в [2], так же не дает достоверных результатов.

Выходом из сложившейся ситуации может служить применение имитационной модели биопродуктивности в совокупности с данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), что позволяет осуществлять оценку урожайности без проведения дорогостоящих полевых измерений. Для данных целей авторами предлагается использование модели биопродуктивности EPIC [3], разработанной Dr. Williams в с/х службе США и космоснимки сканера MODIS со спутников TERRA и AQUA принимаемых в Центре ДЗЗ ЮНИИ ИТ. Использование сканера MODIS, позволяет отслеживать динамику развития культур на уровне региона до 4 раз в сутки, что повышает частоту наблюдений при разреженной динамической облачности.

Ранее, в результате подспутниковых экспериментов [4] было показано, что значения NDVI хорошо коррелируют с такими характеристиками растительного покрова, как индекс площади листьев (LAI), коэффициент вегетационного покрытия и зеленая биомасса (чистая первичная продуктивность). С увеличением значений перечисленных параметров растут и значения NDVI, но зависимость эта линейна только в определенном интервале. Уже при содержании хлорофилла выше 3-5 мг/см² и листовом индексе выше 4-5 наблюдается эффект насыщения NDVI.

Для перехода от индекса NDVI, рассчитанному по данным радиометра MODIS, к листовому индексу LAI, который является одним из наиболее существенных параметров в модели EPIC, используется кусочно-линейная зависимость предложенная авторами алгоритма MOD15 (NASA).

Для прогноза урожайности используется модель биопродуктивности MIDC, которая представляет собой адаптацию модели развития растений EPIC, разработанной в США, к условиям Западной Сибири и Урала. EPIC является непрерывной имитационной моделью блочного типа, которая может использоваться для определения стратегий управления в сельском хозяйстве. Данная модель позволяет рассчитывать основные параметры культуры (биомассу, листовый индекс, высоту растения и др.) на каждый день, что позволяет сравнивать их с данными наземных измерений и дистанционного зондирования и, в случае необходимости, производить корректировку.

В модели EPIC фенологическое развитие культуры основывается на сумме эффективных температур. Потенциальное ежедневное изменение в сухой биомассе (ΔB_p) зависит от листового индекса (LAI) и солнечной радиации (RA):

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

где BE – коэффициент преобразования энергии к биомассе

Реальное ежедневное приращение биомассы корректируется коэффициентом стресса (REG), который определяется как минимальная величина из водного, температурного и азотного стрессов.

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 [5]. В частности в модели присутствует существенное число метеорологических и почвенных характеристик, которые в России не измеряются. Блоки радиации, температуры почвы и азотного баланса реагируют не адекватно. С другой стороны, к основным можно отнести всего 6 метеорологических характеристик (максимальная и минимальная температура воздуха, проходящая солнечная радиация, количество осадков, относительная влажность и скорость ветра), которые полностью или частично измеряются на российских метеостанциях. Из выше сказанного можно сделать вывод о целесообразности применения модели EPIC после проведения ее адаптации к условиям Западной Сибири.

При анализе данных, предоставленных Западно-Сибирским Управлением гидрометслужбы в рамках договора о научном сотрудничестве, было выявлено, что проходящая солнечная радиация не измеряется на большинстве метеостанций, а блок радиации в модели EPIC позволяет найти только максимальную суммарную проходящую радиацию. Поэтому было принято решение заменить блок радиации в модели EPIC.

Для расчёта суточного хода приходящей солнечной радиации предлагается воспользоваться формулой Т.Г. Берлянда, используемой в модели радиационного режима АФИ РАСХН [6]:

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

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 учёта этих факторов предлагается использовать расчет приходящей солнечной радиации (Q) через относительную влажность воздуха:

$$Q = -1.318 \cdot \omega \cdot Q_0 + 0.922 \cdot \omega + 1.357 \cdot Q_0 + 1.012, \text{ для мая}$$

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

где ω - относительная влажность воздуха. При расчёте предполагалось, что даже при наличии сплошной облачности определенный процент радиации достигает поверхности почвы. Оценка точности расчетов приходящей радиации приведена в табл. 1:

Таблица 1. Средняя абсолютная процентная ошибка

Модель\город	Барнаул	Тобольск	Коченово
Расчет по ЕРИС	98,66%	97,77%	111,28%
АФИ	22,18%	25,51%	27,86%

На рис. 1 приведен пример динамики расчетной и экспериментальной суммарной солнечной радиации.

В ходе анализа блока температурного стресса модели ЕРИС было выявлено, что он не адекватно реагирует на изменение температуры почвы (заморозки и перегревание) [5]. Таким образом, возникла проблема разработки блока расчета температуры почвы, зависящей от минимального числа параметров.

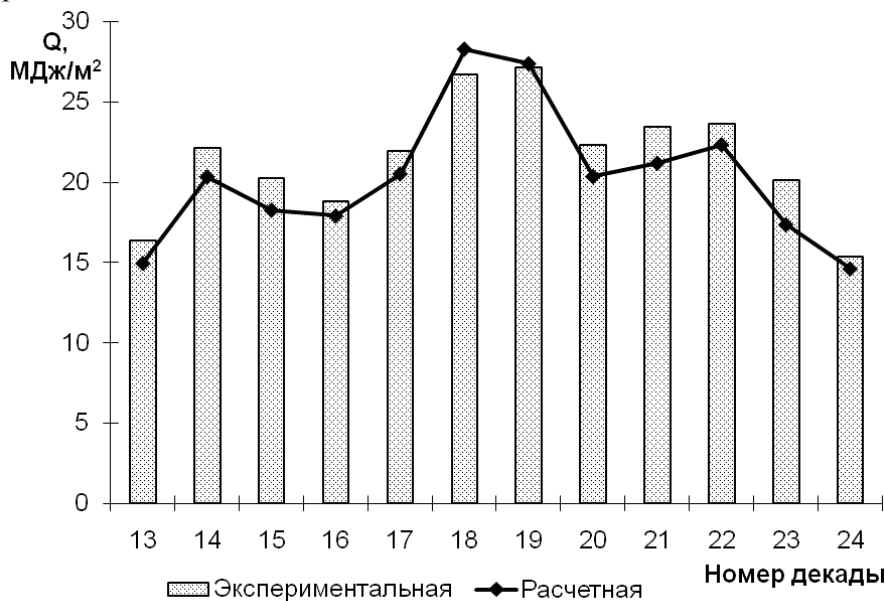


Рис. 1. Изменения расчетной и экспериментальной суммарной солнечной радиации Q (Мдж/(м²·сутки)) за вегетационный период в 2004 г (Барнаул)

Из литературы известно, что днём поверхность почвы нагревается прямой солнечной радиацией, а ночью поверхность охлаждается в результате эффективного излучения (разность восходящего и нисходящего потоков длинноволновой радиации на уровне земли). Причем, минимальная температура воздуха наблюдается перед восходом Солнца, а максимальная температура отмечается через 2 – 3 часа после полудня.

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 вычислений составляет 10.75%.

В ночное время наблюдается взаимосвязь между минимальной температурой почвы и эффективным излучением. Исходя из данного соображения получено соотношение, которое предлагается использовать для 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 двухпотоковая модель длинноволновой радиации [7]. Погрешность вычислений составляет 9.76%.

На рис. 2 приведен пример динамики расчетной и экспериментальной максимальной температуры почвы для метеостанции Барнаул.

Основываясь на соотношениях, описанных выше, была проведена корректировка и настройка модели биопродуктивности ЕРІС для Новосибирской области и Алтайского края на основе метеоданных и данных о фактической урожайности за 1985-2005г.

В 2005-2006 годах на конец первой декады июля выполнено прогнозирование урожайности и сроков созревания яровой пшеницы по Новосибирской области и Алтайскому краю по адаптированной модели биопродуктивности ЕРІС. Прогнозы на 11 июля и 31 августа передавались в департамент АПК администрации Новосибирской области совместно с ЗапСИБРЦПОД. Прогнозируемая биологическая урожайность на 31 августа 2005 года для Новосибирской области составила 14.7 ц/га, для Алтайского края 12.6 ц/га, и на 11 июля 2006 года 8.9 ц/га и 9.6 ц/га соответственно. Динамика прогнозируемой и фактической урожайности яровой пшеницы по Новосибирской области в 2005 году представлена на рис. 3.

Поскольку в регионах Западной Сибири имеется недостаточная густота сети метеостанций, проводилась коррекция листового индекса с использованием зависимости LAI от NDVI по данным сканера TERRA/MODIS. Пример расчетов основных биометрических показателей по модифицированной модели биопродуктивности ЕРІС без коррекции (урожайность 14.06 ц/га) и с коррекцией листового индекса (13.26 ц/га) для Павловского района Алтайского края в 2005 году представлен на рис. 4.

На рис. 5 представлена динамика прогнозируемой урожайности в зависимости от фактических метеоусловий. Осадки являются основным лимитирующим фактором в засушливой зоне рискованного земледелия на юге Западной Сибири. Из рисунка видно, что колебания в расчетных значениях биологической урожайности яровой пшеницы становятся минимальными конце июля. Это подтверждает возможность прогноза урожайности яровой пшеницы на юге Западной Сибири за месяц до начала уборки.

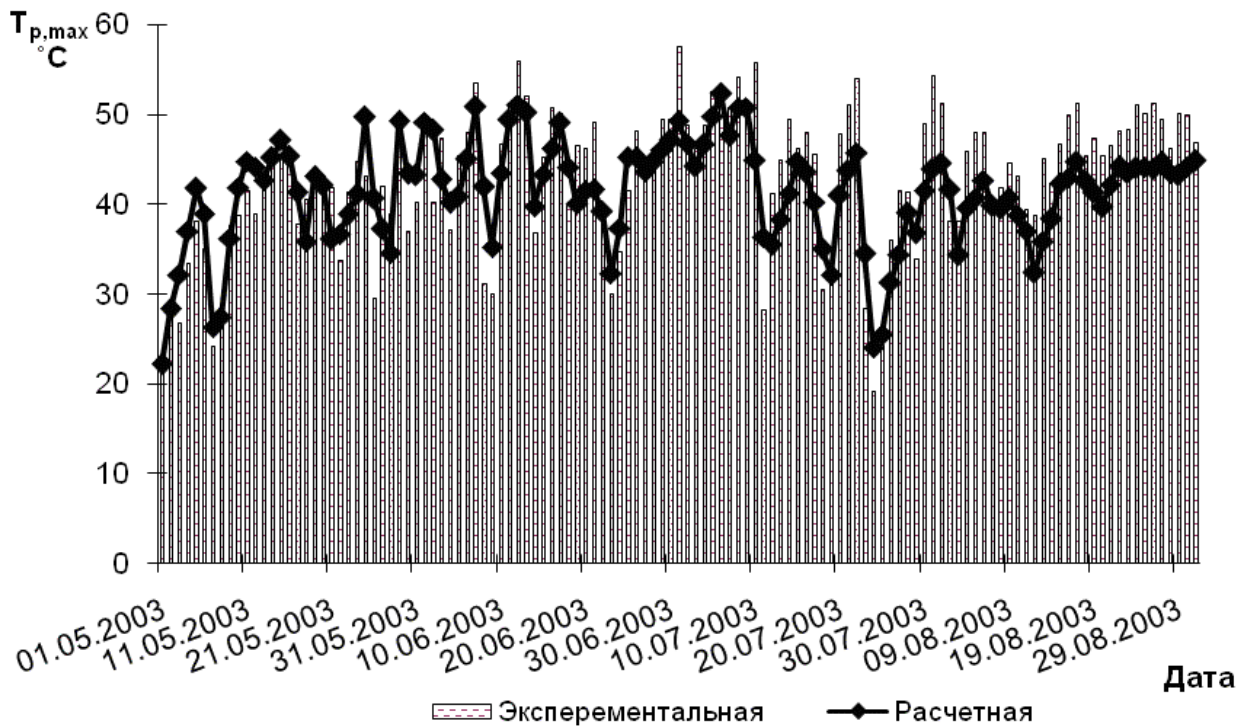


Рис. 2. Изменения расчетной и экспериментальной максимальной температуры почвы (°C) в течение вегетационного периода в 2003 г (Барнаул)



Рис.3. Динамика прогнозируемой и фактической урожайности яровой пшеницы по Новосибирской области в 2005 г.

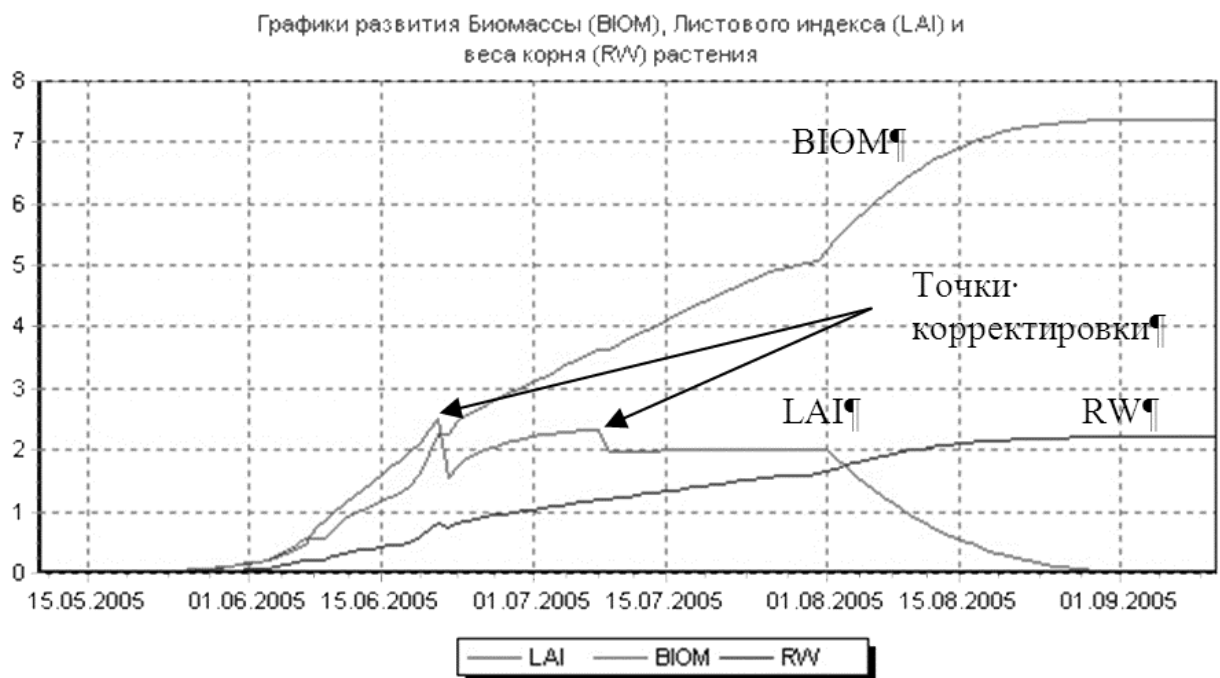
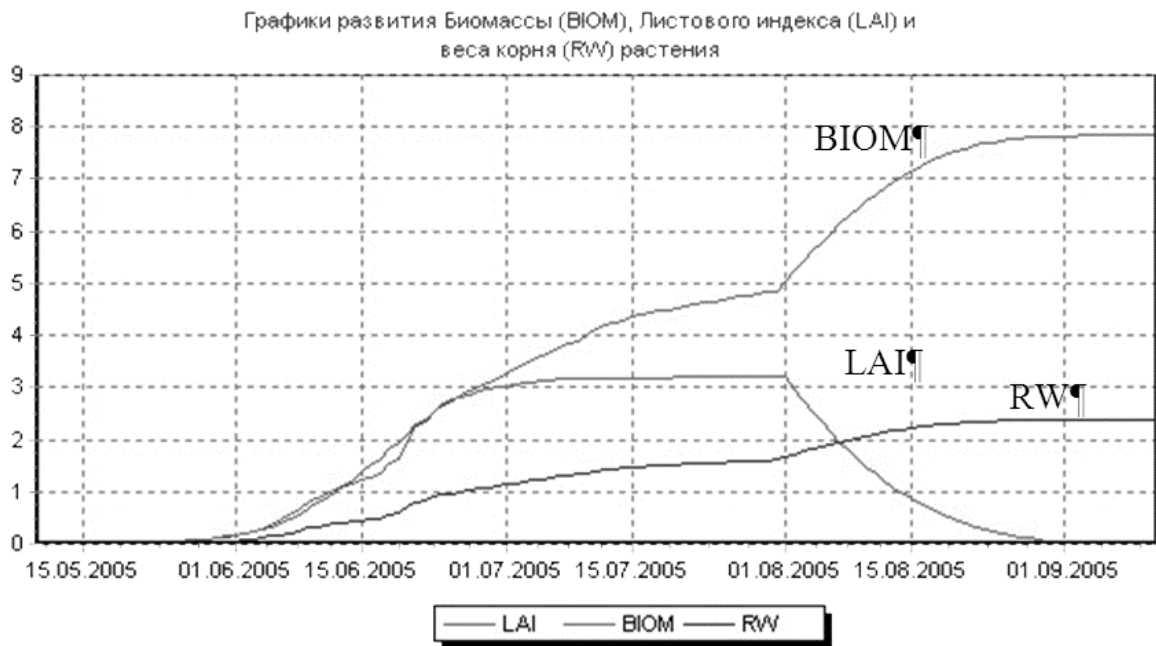


Рис. 4. Динамика изменения биомассы, листового индекса и массы корня растений по результатам расчетов без коррекции и с коррекцией листового индекса по снимку MODIS

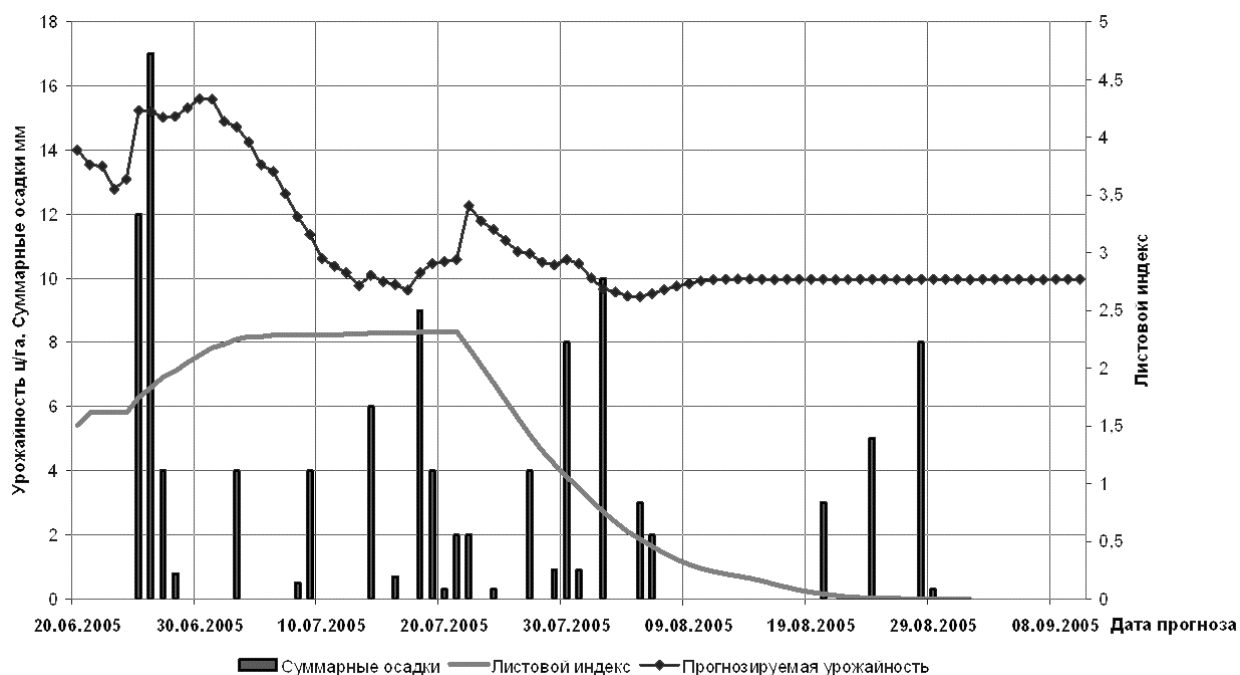


Рис. 5. Динамика прогнозируемой урожайности в сравнении с листовым индексом и осадками для метеостанции Здвинск Новосибирской области

Заключение

Таким образом, интеграция наземных измерений биометрических параметров растительности, ежедневных метеоданных, значений статистической урожайности и сканерных космических изображений в единую систему позволяет производить экспорт данных в модель биопродуктивности и последующий анализ результатов. Использование методологии моделирования биопродуктивности по модели EPIC совместно с данными дистанционного зондирования повышает точность расчета урожайности основных сельскохозяйственных культур.

Данная технология предполагает использование архивных космоснимков за предыдущие годы для определения в различных агроклиматических зонах региона тестовых полей достаточной площади и конфигурации для расчета на период вегетации зерновых культур в текущий год вегетационного и листового индексов. Выполняются ежедневные расчеты биопродуктивности яровых зерновых культур по модифицированной методике EPIC с корректировкой расчетных значений листового индекса (LAI) на основе спутниковой оценки вегетационного индекса. Периодичность коррекции не менее 2х раз неделю с учетом разреженной облачности на период до начала спада листового индекса связанного с естественным увяданием листового покрова зерновых культур. На основании расчетов по модели прогнозируются биологическая урожайность культур и оптимальные сроки начала уборки в разрезе районов или субъекта федерации. Для повышения точности целесообразно использование метеоданных с портативных автоматических метеостанций, устанавливаемых в зерносеющих хозяйствах.

На основании метеоданных и космического мониторинга по модифицированной модели рассчитывают основные параметры культуры (биомассу, листовый индекс, вес корня, высоту растений) и прогнозируют сроки биологического созревания зерновых культур и оптимальные сроки начала уборки. Прогноз урожайности для различных зерновых культур выдается за месяц до начала уборки с точностью до 1-2 ц/га.

Применение данной методики перспективно для оценки урожайности и валовых сборов на территории Поволжского, Уральского и Сибирских федеральных округов в интересах органов государственной власти, банковских структур, предоставляющих кредиты и страховых компаний, возмещающих ущерб сельхозпроизводителям в связи с потерями урожая.

Литература

1. *Хворова Л.А., Брыксин В.М.* Применение математических методов и математического моделирования для оценки агроклиматического потенциала территорий // Известия Алтайского государственного университета. №1(23). 2002. С.41-45.
2. *Евтюшкин А.В., Юшаков В.Н.* Разработка элементов технологии мониторинга зерновых культур в Алтайском крае // Труды Международной конференции "Современные проблемы информационных технологий и космический мониторинг". Ханты-Мансийск. 2001. С. 154-158.
3. *Williams J.R.* The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC). Technical Reference. US Department of Agriculture. 1997.
4. *Евтюшкин А.В., Рычкова Н.В.* Изучение динамики вегетационного индекса сельскохозяйственной зоны Западной Сибири по данным NOAA и подспутниковых полигонных измерений // Информационные технологии и космический мониторинг: Материалы 3-й научно-практической конференции «Электронная Россия», Ханты-Мансийск, 2004г.- Екатеринбург: «Издательство Баско», 2004.-80.:ил. С. 54-61.
5. *Хворова Л.А., Брыксин В.М., Масленников Д.В.* Система имитационного моделирования агроэкосистем // Вестник алтайской науки "Проблемы агропромышленного комплекса". Т.1. Барнаул: АГУ, 2001. С. 277-279.
6. *Полуэктов Р.А.* Динамические модели агроэкосистемы. Л.: Гидрометеиздат, 1991.
7. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984.