

На правах рукописи



БРЫКСИН ВИТАЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И
ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ОЦЕНКИ УРОЖАЙНОСТИ
ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Барнаул – 2009

Работа выполнена в лаборатории сетевых информационных технологий
Автономного учреждения Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Югорский научно-исследовательский институт
информационных технологий»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Хворова Любовь Анатольевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Пышнограй Григорий Владимирович

кандидат технических наук, с.н.с
Калантаев Петр Алексеевич

Ведущая организация: ФГОУ ВПО «Алтайский государственный
аграрный университет»

Защита диссертации состоится 26 июня 2009 г. в 13-00 часов
на заседании диссертационного совета Д 212.005.04 в ГОУ ВПО «Алтайский
государственный университет» по адресу: 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке
Алтайского государственного университета по адресу: 656049, г. Барнаул,
пр. Ленина, 61.

Автореферат разослан 25 мая 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д. ф.-м. н., профессор



С.А. Безносюк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Зерновая отрасль является важнейшей составной частью продовольственного комплекса страны. Около 60% агропромышленного производства непосредственно связано с зерновыми ресурсами. Поэтому зерновое производство не только определяет основу продовольственной безопасности страны, но и является системообразующим для остальных секторов сельского хозяйства, и, прежде всего продукции животноводства.

В Западной Сибири по данным Росстата пашня занимает 14,9 млн.га. (19,5% от общероссийской). Валовые сборы зерновых, в зависимости от года, составляют 11–15% от общероссийских, 90–95% из которых относятся к продовольственным сортам. Сельскохозяйственные регионы расположены в зоне рискованного земледелия. Погодные условия существенным образом влияют на урожайность зерновых культур. Валовые сборы в благоприятные годы могут существенно превысить сборы в неблагоприятные годы.

Возникает потребность прогноза урожайности зерновых культур, соответственно оценки валовых сборов и, как следствие, площадей посевов. Решение задачи прогноза урожайности зерновых культур требует привлечения методов математического моделирования, современных информационных технологий и экспертных оценок. В связи с обширностью сельскохозяйственных угодий в Западной Сибири становится актуальной задача мониторинга с использованием данных космосъемки с метеорологических спутников.

Основу методического и информационного обеспечения работ по оценке урожайности зерновых культур должны составлять модели биопродуктивности сельскохозяйственных культур, комплекс математических моделей прогнозирования урожайности.

Существует два основных подхода к оценке продуктивности зерновых культур. Первый, – использование статистических и имитационных моделей различного уровня детализации, основывающихся на экспериментально определенных зависимостях роста и развития культур в зависимости от наборов метеорологических данных: температуры и влажность воздуха и почвы, осадков, уровня фотосинтетически активной радиации, даты сева, содержания питательных элементов в почве и др. В настоящее время известно достаточно много различных моделей, которые можно разделить на

- физико-статистические или балансовые, основывающиеся на регрессионных зависимостях (Томминг Х.Г., Шашко Д.И., Давитая Ф.Ф., de Wit С.Т. и др.);
- математико-статистические или динамико-регрессионные, основывающиеся, как правило, на эмпирических зависимостях нелинейного типа (Бондаренко Н.Ф., Константинов А.Р., Уланова Е.С., Desai Р. и др.);
- комплексные динамические имитационные модели (Бихеле З.Н., Молдау Х.Л., Росс Ю.К., Сиротенко О.Д., Полужтков Р.А., Williams J.R., Supit I., van Diepen С.А. и др.).

Второй подход основан на использовании регрессионных зависимостей между ожидаемой продуктивностью зерновых культур и различными

спутниковыми спектральными параметрами (Барталёв С.А., Коробов Р.М., Tucker C.J., Hatfield J.L. и др.). Как правило, рассматривается зависимость характеристик зерновых культур (листовой индекс, урожайность и др.) от спутниковых вегетационных индексов (нормализованный вегетационный индекс NDVI и др.).

В последнее время появились многочисленные работы, направленные на улучшение имеющихся моделей путем включения в них спутниковых данных (Миронов В.Л., Евтюшкин А.В., Maas S.J., Doraiswamy P.C. и др.). Перспективной для использования является модель продуктивности сельскохозяйственных культур EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator), которая разработана Сельскохозяйственной научно-исследовательской службой Департамента Сельского хозяйства Соединенных Штатов (Soil and Water Research Laboratory USDA). Следует отметить, что в настоящее время в условиях России отсутствуют работоспособные технологии прогноза урожайности зерновых культур, интегрированные в сельскохозяйственное производство и основанные на математических моделях и космической информации.

Таким образом, проблема осуществления заблаговременного прогноза по адекватной математической модели с использованием данных космосъемки является актуальной.

Цель работы. Разработка математической модели и алгоритмов, предназначенных для прогнозной оценки урожайности зерновых культур с использованием спутниковых данных в условиях Западной Сибири.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Выбор и анализ динамической модели, описывающей закономерности процессов роста и развития зерновых культур для оценки урожайности и валовых сборов зерна.
2. Разработка отдельных блоков модели, содержащих описание основных процессов, протекающих в атмосфере, приземном воздухе и почве с учетом комплекса наземной и космической информации.
3. Разработка базы данных, позволяющей хранить и обрабатывать агрометеорологическую информацию по различным культурам и климатическим зонам, предоставляющей возможности выборки данных, отвечающих определенным критериям.
4. Проведение параметрической идентификации модели по наземным данным и космическим снимкам.
5. Реализация полученной технологии в виде комплекса программных средств и апробация модели в процессе прогноза урожайности в конкретных условиях Западной Сибири.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, математического и имитационного моделирования, вычислительной математики и математической статистики, теории проектирования баз данных, технологии обработки космических данных.

Научная новизна:

1. Разработаны математические модели блоков коротковолновой радиации и температурного режима почвы с определением температуры на поверхности почвы с учетом приходящей солнечной радиации и модифицирована структура существующей динамической модели продуктивности сельскохозяйственных культур ЕРИС с учетом имеющейся в России агрометеорологической информации.
2. Разработаны и обоснованы методики использования неполных наборов метеоданных в качестве входных данных усовершенствованной имитационной модели на основе ЕРИС, предложены подходы к прогнозной оценке и восстановлению суточных значений параметров, прямые измерения которых недоступны.
3. Разработан программный комплекс для проведения расчетов по оперативной оценке урожайности зерновых культур на основе модели биопродуктивности и данных космического мониторинга.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, содержащихся в диссертационном исследовании, обеспечивается использованием современной теории, апробированных методов и средств моделирования сложных агроэкологических систем, технологий вычислительных экспериментов, соответствием фактических значений агрометеорологических показателей расчетным, подтверждением на практике результатов прогноза урожайности зерновых культур на территории Тюменской, Новосибирской областей и в Алтайском крае в период 2004-2006 гг.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанная и адаптированная к условиям Западной Сибири модель продукционного процесса сельскохозяйственных культур на основе имитационной динамической модели продуктивности ЕРИС способствует дальнейшему развитию и применению методов математического моделирования и современных информационных технологий для установления количественных зависимостей формирования урожая от агрометеорологических факторов, а также в области упреждающего прогнозирования урожайности зерновых культур.

Представленные в диссертации материалы могут быть использованы научными учреждениями сельскохозяйственного профиля для проведения теоретических и прикладных исследований; высшими учебными заведениями для обучения студентов и аспирантов аграрных, почвенных, биологических и экологических специальностей; опытными хозяйствами, занимающимися внедрением информационных технологий, а также организациями, осуществляющими агроэкологический мониторинг.

На защиту выносятся:

1. Математические модели блоков солнечной радиации и температурного режима почвы в модели биопродуктивности ЕРИС на основе фактически измеряемых метеопараметров.
2. Математическая модель коррекции по космоснимкам листового индекса и биомассы в динамической имитационной модели ЕРИС.

3. Комплекс инструментальных программных средств для оперативной оценки урожайности зерновых культур на основе модели биопродуктивности и данных космического мониторинга.
4. Результаты применения созданных математических моделей и программных средств для прогнозирования урожайности в зерновых провинциях Западной Сибири.

Апробация работы. Основные результаты работы представлены автором на следующих научных конференциях:

Международные: международная конференция студентов и аспирантов «Экономика. Бизнес. Информационные технологии» (Барнаул, 2001); международная научно-практическая конференция «Современные проблемы, тенденции и перспективы управления региональными социально-экономическими системами» (Усть-Каменогорск, 2002); международная научно-практическая конференция «Современный агробизнес: состояние и перспективы развития» (Барнаул, 2003); международный научный Конгресс «ГЕО-Сибирь-2005» (Новосибирск, 2005); международный симпозиум по дистанционному зондированию окружающей среды «Global Monitoring for Sustainability and Security» (Санкт-Петербург, 2005); VI Международный симпозиум «Контроль и реабилитация окружающей среды» (Томск, 2008).

Всероссийские: всероссийская конференция «Математические методы в механике природных сред и экологии» (Барнаул, 2002); III и IV Научно-практическая конференция «Обратные задачи и информационные технологии рационального природопользования» (Ханты-Мансийск, 2006, 2008); Четвёртая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2006); Всероссийская научно-техническая конференция «Роль и место дистанционного зондирования Земли в инфраструктуре пространственных данных» (Екатеринбург, 2007).

Межрегиональные и региональные: 4 сибирский конгресс по прикладной математике ИНПРИМ-2000 «Региональные проблемы развития Сибири и Дальнего востока» (Новосибирск, 2000 г.) и др.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты реализованы и внедрены в рамках работ по выполнению госбюджетных программ:

- госконтракта на НИР № 38/04 «Космический мониторинг состояния сельскохозяйственных посевов, прогноз урожайности и валовых сборов зерновых культур в Тюменской области» между ЮНИИИТ и Департаментом АПК администрации Тюменской области, 2004 г.;
- госконтракта ЮНИИИТ на НИР «Развитие систем оперативного мониторинга и предсказания природных и техногенных процессов в Ханты-мансийском автономном округе – Югре на основе данных дистанционного зондирования земли из космоса, наземных измерений, геоинформационных систем и имитационного математического моделирования». Номер гос. регистрации НИР 0120.0 508578, 2005–2008 гг.

Публикации. По теме диссертационной работы автором опубликовано более 30 работ. Перечень основных работ приведен в конце автореферата, в том числе в одном издании, рекомендованном ВАК для публикации результа-

тов диссертационных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, 2 приложений и списка используемых источников и литературы (175 наименований). Основной материал изложен на 152 страницах, включая 13 таблиц, 59 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, объект и предмет, научная новизна и положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость, апробация результатов исследования, кратко отражено содержание диссертации.

В первой главе диссертации рассматриваются существующие подходы к построению и применению математических моделей роста и развития сельскохозяйственных культур, а именно: эмпирический и теоретический. Эмпирический подход используется в разработках прикладных моделей, например для поддержки технологических решений аграрного производства, или для целей планирования и управления в экономике сельского хозяйства. Эмпирическая модель содержит величины, соотношения между которыми описываются заранее заданными и логически обоснованными эвристическими функциями, параметры которых (статические и динамические) определяются по данным натурных наблюдений. Теоретический подход используется при разработке моделей, предназначенных преимущественно для научных исследований. С помощью теоретической модели проверяются априорные положения о природной сущности изучаемых явлений и процессов. Создание комплексной модели агроэкосистемы в целом или разработка компонентов такой модели, например, блоков радиационного режима атмосферы, теплового режима почв, азотного питания растений, на основе только теоретического подхода является исключительно трудной задачей. Поэтому большинство моделей, претендующих на теоретический характер описания, представляет собой продукт синтеза эмпирического и теоретического подходов.

В диссертации рассматриваются варианты эмпирических моделей, преимущество которых состоит в том, что они значительно проще, чем теоретические, и их значительно быстрее и легче построить. Основным недостаток эмпирических моделей состоит в том, что их параметры обычно не имеют биологического смысла.

Анализ литературы показывает, что попытки построения эмпирических моделей, отражающих связь урожая с природными и антропогенными факторами на основе данных многофакторного опыта, не дают желаемого результата. Причиной этого является невозможность учесть в эмпирических моделях реальную изменчивость погодных условий и варьирующих в больших пределах других факторов урожая (влажность почвы, содержание в почве доступных для растения элементов питания и др.). Как показывает практика отечественных и зарубежных исследований, единственный путь преодоления сложив-

шихся противоречий связан с построением и использованием в практике принятия агротехнических и мелиоративных решений динамических имитационных моделей агроэкосистемы различного назначения и различной степенью детализации.

В диссертации на основе анализа литературных источников рассмотрены общие вопросы, связанные с построением прикладных динамических моделей агроэкосистем (модели второго уровня продуктивности), приведено описание основных блоков, составляющих архитектуру большинства подобных моделей, и содержащихся в них основных соотношений в плане определения необходимой агрометеорологической информации и степени ее временной дискретизации.

По большинству найденных в литературе моделей даны лишь краткие характеристики (описание, область применения, требуемые входные данные, выходные данные, язык программирования). В основном, судя по имеющимся описаниям, это узкоспециальные модели, которые выполнены по заказам предприятий и позволяют рассчитывать ограниченное число параметров. По некоторым доступным моделям был проведен анализ и тестирование. Выявлены недостатки и достоинства каждой модели, а также решен вопрос о возможности использования уже существующих моделей для прогноза урожайности сельскохозяйственных культур для территорий Алтайского края и Сибири.

Наиболее доступными для изучения, тестирования и непосредственного использования были три модели: непрерывная модель биопродуктивности ЕРИС; динамическая модель агроэкосистемы СИМОНА (Санкт-Петербургский Агрофизический институт); модель азотного баланса в системе озимая пшеница–почва (Centre for Agrobiological Research (CABO): Department of Theoretical Production Ecology, Agricultural University, Wageningen).

На основе сравнительного исследования указанных выше моделей в диссертации обосновывается выбор модели биопродуктивности ЕРИС для прогнозной оценки урожайности на территории Западной Сибири. Данная модель позволяет производить корректировку в процессе расчетов. Например, корректировку листового индекса (LAI) можно выполнять по данным дистанционного зондирования через индекс $NDVI$ (нормализованный вегетационный индекс), который линейно связан с LAI . Модель ЕРИС позволяет оценить реакцию растений на широкий спектр процессов, происходящих на сельскохозяйственном поле, направленность и темп протекания которых определяются как неконтролируемыми (погодными) условиями, так и контролируемыми внешними воздействиями (агротехника) на агроэкосистему. ЕРИС позволяет вычислять основные параметры растительности (биомассу, высоту, листовый индекс и т.д.) каждый день, что позволяет сравнивать их с данными наземных измерений и данными дистанционного зондирования.

В результате тестирования и использования технологии ЕРИС были выявлены следующие недостатки:

- 1) При отсутствии экспериментальных данных по приходящей коротковолновой радиации в ЕРИС генерируются данные, сильно отличающиеся от реальных. В результате возникают большие погрешности в расчетах. Как показал опыт сбора необходимой агрометеоинформации, многие

метеостанции коротковолновую радиацию не измеряют. Поэтому возникает проблема модификации и настройки модели для регионов Западной Сибири.

2) Важным входным параметром модели является температура поверхности почвы (минимальная и максимальная). Как правило, такая информация также отсутствует на многих метеостанциях.

В связи с тем, что в качестве базовой была выбрана модель ЕРІС, возникла задача разработки программного комплекса, состоящего из трех взаимосвязанных блоков: блока длинноволновой радиации (ДВР) или эффективного излучения (для определения температуры на поверхности почвы в ночное время), блока коротковолновой радиации (КВР для определения температуры на поверхности почвы в дневные часы) и блока теплового режима почвы.

В заключении первой главы диссертации рассматривается разработка технологии прогноза урожайности зерновых культур по отдельным областям Западной Сибири с использованием космических снимков и компьютерного моделирования, включающая:

1. Адаптацию модели биопро-дуктивности ЕРІС и программных средств для расчета урожайности на территории Западной Сибири. Данный этап включает в себя разработку базы наземных данных и обработанных данных дистанционного зондирования; разработку блок-схем алгоритмов расчетов по прогнозу урожайности.



Рис. 1. Блок-схема модернизированной модели ЕРІС (серым выделены измененные блоки)

2. Разработку методики сбора и обработки исходных наземных данных и данных дистанционного зондирования. Данный этап предполагает сбор необходимой агрометеоинформации для модели в Гидрометеослужбах регионов и в результате наземного обследования тестовых полей.

3. Разработку алгоритмов и программных средств поддержки модели, включая проверку адекватности. Данный этап предполагает усовершенствование модели с включением вновь разработанных блоков: приходящей КВР и ДВР, теплового режима почвы.

4. Апробацию методики прогноза урожайности в реальных условиях Западной Сибири.

Вторая глава диссертации посвящена вопросам модификации модели биопро-дуктивности ЕРІС в условиях Западной Сибири, разработке блоков радиационного режима атмосферы и теплового режима почвы. В разделе 1.3 диссертации приведены результаты тестирования модели ЕРІС на данных, предоставленных Западно-Сибирским Управлением гидрометслужбы по Новосибирской области и Алтайскому краю, Тюменским Центром гидрометслужбы по

Тюменской области. В результате тестирования выяснилось, что предоставленные наборы агро- и метеоданных не полные, а именно отсутствует необходимая информация для модели: величина приходящей КВР и температура поверхности почвы. В связи с этим возникла задача восполнения неполноты исходной агро- и метеоинформации за счет разработки блоков радиации (КВР и ДВР), теплового режима почвы (определение минимальной и максимальной температуры на поверхности почвы и расчета динамики температуры в профиле почвы). Математическим аппаратом, описывающим комплекс физических явлений, протекающих в почве и атмосфере, являются дифференциальные уравнения с заданными начальными или краевыми условиями.

Модель КВР. Для расчёта суточного хода КВР предлагается воспользоваться формулой Т.Г. Берлянда:

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

где S_0 – солнечная постоянная, а f – коэффициент, зависящий от географической зоны и времени года. Для вычисления зависимости коэффициента от времени года для различных мест наблюдения составлены таблицы. Расчет высоты Солнца h_s производится по формулам:

$$\sin h_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(2\pi(t_h + 12)/24), \quad (2)$$

$$\delta = -0.408 \cos(2\pi(t_d + 10)/365), \quad (3)$$

где φ – географическая широта места, δ – угол склонения Солнца, t_h – текущее время внутри суток, выраженное в часах и отсчитываемое от полудня, t_d – номер суток, отсчитываемый от 1 января. Величина Q_0 , очевидно, должна быть равной нулю при отрицательных h_s , т. е. между заходом и восходом Солнца. Заход и восход Солнца рассчитываются по формулам:

$$t_h^{\text{зак}} = -\frac{12}{\pi} \arcsin\left(-\frac{\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}\right); \quad (4)$$

$$t_h^{\text{вос}} = 24 - t_h^{\text{зак}}. \quad (5)$$

При вычислении приходящей к посеву радиации в ходе моделирования теплового режима почвы использована формула (1). На каждом временном шаге проверяется условие нахождения текущего времени в интервале $t_h^{\text{зак}} \leq t \leq t_h^{\text{вос}}$ и Q_0 приравнивается к нулю, если это условие нарушено.

Даже при безоблачном небе в приходящей радиации содержится и прямая и рассеянная составляющие. При этом доля рассеянной радиации уменьшается с увеличением высоты Солнца h_s . При наличии сплошной облачности вся радиация становится рассеянной, а ее величина связана с Q_0 коэффициентом ослабления радиации. По многочисленным литературным данным интенсивность радиации зависит от h_s , прозрачности атмосферы, степени облачности, продолжительности солнечного сияния. Так как в предоставленных данных отсутствуют продолжительность солнечного сияния и облачность, учёт

этих факторов, влияющих на величину КВР, ввели через влажность воздуха. Величина приходящей к посеву радиации уточняется по формулам:

$$Q = -1.318 \cdot \omega \cdot Q_0 + 0.922 \cdot \omega + 1.357 \cdot Q_0 + 1.012, \text{ для мая}; \quad (6)$$

$$Q = -1.448 \cdot \omega \cdot Q_0 - 0.035 \cdot \omega + 1.682 \cdot Q_0 + 0.077, \text{ для июня-августа}, \quad (7)$$

где ω - относительная влажность воздуха. При расчёте Q предполагалось, что даже при наличии сплошной облачности определенный процент КВР достигает поверхности почвы. Соотношения (6) и (7) были определены по многолетним экспериментальным данным.

Оценка точности расчетов КВР приведена в таблице 1:

Таблица 1

Средняя абсолютная процентная ошибка			
Модель\город	Барнаул	Тобольск	Коченёво
Расчет по ЕРИС	98.66%	97.77%	111.28%
Симона (АФИ)	22.18%	25.51%	27.86%

На рисунке 2 приведен пример изменения расчетной и экспериментальной суммарной солнечной радиации Q в г. Барнауле.

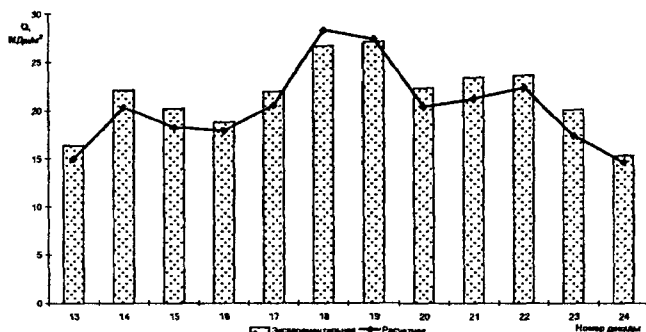


Рис. 2. Изменения расчетной и экспериментальной суммарной солнечной радиации Q (Мдж/(м²·сутки)) в течение вегетационного периода 2004 г (Барнаул)

Модель ДВР. При моделировании используется двухпоточковая модель длинноволновой радиации, т.е. эффективное излучение рассматривается как разность двух потоков. Излучение слоя, направленное вниз, отчасти поглощается и ослабевает в нижних слоях, но зато к нему присоединяется излучение этих последних. Этот процесс называется переносом излучения. На земле мы наблюдаем излучение атмосферы, как сумму таких частично ослабленных излучений отдельных слоев. В атмосфере на высоте, например, z мы можем наблюдать не только нисходящий поток такого излучения $F^\downarrow(z)$, но и восходящий поток $F^\uparrow(z)$, складывающийся из излучения поверхности Земли и нижних слоев атмосферы, ослабленного по пути до высоты z . Значения $F^\downarrow(z)$ и $F^\uparrow(z)$ зависят от высоты.

Определение температуры на поверхности почвы. Как известно, днём поверхность почвы нагревается прямой солнечной радиацией, а ночью поверхность охлаждается в результате эффективного излучения, и от неё охлаждаются

ся прилегающие слои воздуха. Причем, минимальная температура воздуха наблюдается перед восходом Солнца, а максимальная температура отмечается через 2 – 3 часа после полудня.

По экспериментальным данным установлена зависимость между максимальной температурой почвы и суммарной радиацией:

$$T_{p,\max} = 1.2784 \cdot T_{v,\max} + 0.4499 \cdot Q + 0.4744, \quad (8)$$

где $T_{p,\max}$ – максимальная температура на поверхности почвы, $T_{v,\max}$ – максимальная температура воздуха, Q – суммарная коротковолновая радиация. Для Барнаула погрешность вычисления составляет 10.75%.

В ночное время наблюдается взаимосвязь между минимальной температурой почвы и эффективным излучением. В качестве аппроксимирующей математической функции было выбрано уравнение линейной двухфакторной регрессии:

$$T_{p,\min} = 0.8024 \cdot T_{v,\min} + 1.4789 \cdot E + 4.6385, \quad (9)$$

где $T_{p,\min}$ – минимальная температура на поверхности почвы, $T_{v,\min}$ – минимальная температура воздуха, E – эффективное излучение. Параметры уравнения регрессии оценивались по выборочному, но достаточно большому временному ряду экспериментальных значений температуры на поверхности почвы и расчетным значениям $E = F^\downarrow(0) - F^\uparrow(0)$ по модели ДВР по методу наименьших квадратов. С помощью корреляционного анализа осуществлена проверка адекватности полученной модели. Для Барнаула погрешность вычислений по формуле (9) составляет 9.76%.

Температура профиля почвы рассчитывается с использованием уравнения теплопереноса.

Суточная динамика температуры воздуха. При расчетах длинноволновой радиации и температурного профиля почвы необходимо использовать данные по температуре воздуха и верхнего слоя почвы с шагом времени в 1 час и менее. Однако, в предоставляемых данных, в большинстве случаев присутствует лишь информация с шагом в 1 сутки. Для решения данной проблемы предлагается воспользоваться кусочно-непрерывной функцией $F(t, j)$, где t – время от полуночи в часах, j – номер дня от начала года, построенной на основе минимальной и максимальной температур воздуха исходя из следующих соображений:

- минимальная температура достигается на рассвете, а максимальная через два часа после полудня;

- к закату температура падает до значения $T_{\min, j+1} + k \cdot (T_{\max, j} - T_{\min, j+1})$, где коэффициент $k \in [0; 1]$ рассчитывается по экспериментальным данным;

- в интервалах $[t_{d,j}; t_m + 2]$, $[t_m + 2; t_{s,j}]$ и $[t_{s,j}; t_{d,j+1}]$ функция $F(t, j)$ задается квадратичной зависимостью $a \cdot t^2 + b \cdot t + c$, где t_d, t_m, t_s – время рассвета, полудня и заката соответственно. При этом $F(t, j)$ имеет следующие точки

экстремума для соответствующих интервалов: $t_m + 2$ – максимум для интервала $[t_{d,j}; t_m + 2]$; $t_m + 2$ – максимум для $[t_m + 2; t_{s,j}]$; t_d – минимум для $[t_{s,j}; t_{d,j+1}]$. Исходя из выше перечисленных соображений, составляем 3 системы линейных уравнений для поиска коэффициентов a, b, c , при этом учитываем, что в точках стыковки функция должна быть непрерывна:

$$\begin{aligned}
 1) \quad & \begin{cases} F(t_d, j) = T_{\max, j} \\ F(t_m + 2, j) = T_{\max, j}, \text{ при } t \in [t_{d,j}; t_m + 2] \\ F'(t_m + 2, j) = 0 \end{cases} \\
 2) \quad & \begin{cases} F(t_m + 2, j) = T_{\max, j} \\ F(t_{s,j}, j) = T_{\min, j+1} + k \cdot (T_{\max, j} - T_{\min, j+1}), \text{ при } t \in [t_m + 2; t_{s,j}] \\ F'(t_m + 2, j) = 0 \end{cases} \\
 3) \quad & \begin{cases} F(t_{s,j}, j) = T_{\min, j+1} + k \cdot (T_{\max, j} - T_{\min, j+1}) \\ F(t_{d,j+1}, j) = T_{\min, j+1} \\ F'(t_{d,j+1}, j) = 0 \end{cases}, \text{ при } t \in [t_{s,j}; t_{d,j+1}].
 \end{aligned}$$

Время рассвета и заката рассчитываются по формулам: $t_{d,j} = t_m - \frac{t_{\text{long},j}}{2}$,

$t_{s,j} = t_m + \frac{t_{\text{long},j}}{2}$, где t_{long} – продолжительность солнечного сияния. При нахождении a, b, c учитывалось, что интервал $[t_{s,j}; t_{d,j+1}]$, с учетом смены дат, разбивается на 2 интервала: $[0; t_{d,j}]$ и $[t_{s,j}; 24]$. Таким образом, получаем 4 набора коэффициентов a, b, c для соответствующих интервалов:

$$\begin{aligned}
 1) \quad & a = k \cdot \frac{(T_{\max, j-1} - T_{\min, j})}{(t_{d,j} - (t_{s,j-1} - 24))^2}, b = -2at_{m,j}, c = T_{\min, j} + at_{m,j}^2, \text{ при } t \in [0; t_{m,j}]; \\
 2) \quad & a = -\frac{(T_{\max, j} - T_{\min, j})}{(t_{d,j} - (t_m + 2))^2}, b = -2a(t_m + 2), c = T_{\max, j} + a(t_m + 2)^2, \text{ при} \\
 & t \in [t_{d,j}; t_m + 2]; \\
 3) \quad & a = (k-1) \cdot \frac{(T_{\max, j} - T_{\min, j+1})}{(t_{s,j} - (t_m + 2))^2}, b = -2a(t_m + 2), c = T_{\min, j} + a(t_m + 2)^2, \text{ при} \\
 & t \in [t_m + 2; t_{s,j}];
 \end{aligned}$$

$$4) a = k \cdot \frac{(T_{\max,j} - T_{\min,j+1})}{((t_{d,j+1} + 24) - t_{s,j})^2}, b = -2a(t_{d,j+1} + 24), c = T_{\min,j} + a(t_{d+1,j} + 24), \text{ при } t \in [t_{d,j}; 24].$$

По экспериментальным данным было получено, что $k = 0.46$.

На рисунке 3 приведен пример изменения расчетной и фактической температуры воздуха для с. Ключи Алтайского края 03.07.2000 г. Погрешность вычислений составляет 4.66%.

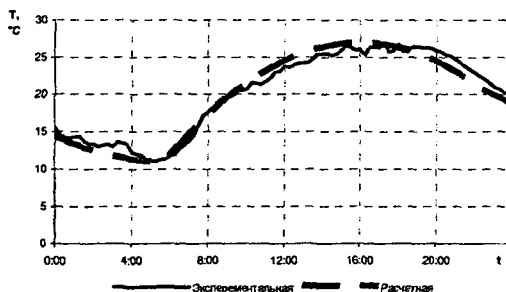


Рис. 3. Изменения расчетной и фактической температуры воздуха (°C) за 03.07.2007 (с. Ключи Алтайского края)

Корректировка листового индекса и биомассы по спутниковым данным. Значения вегетационного индекса (*NDVI*), рассчитываемого по космоснимкам сканера MODIS с космических аппаратов TERRA и AQUA, хорошо коррелируют с такими характеристиками растительного покрова, как листовый индекс (*LAI*). Авторами алгоритма MOD15 (NASA) для обработки изображений MODIS были получены кусочно-линейные зависимости между *LAI* и *NDVI* для различных ландшафтов. Расчет индекса *NDVI* проводился по контурам тестовых полей.

На основе модельных и фактических данных были получены зависимости, приведённые ниже, биомассы и массы корней от листового индекса, рассчитанных на основе индекса *NDVI*, что позволяет производить корректировку моделируемых значений.

$$BIOM = 1.092526 \cdot LAI_{NDVI} - 0.571142, \text{ при росте } LAI;$$

$$BIOM = BIOM_{DM} + 0.2636 \cdot (LAI_{DM} - LAI_{NDVI}) - 0.001964, \text{ при падении } LAI;$$

$$RW = 0.311123 \cdot BIOM + 0.032719,$$

где *BIOM* и *RW* — моделируемые значения биомассы и массы корня; *LAI_{NDVI}* — листовый индекс, полученный из индекса *NDVI*; *LAI_{DM}* и *BIOM_{DM}* — моделируемый листовый индекс и биомасса в день, когда *LAI* максимален.

В третьей главе описывается применение созданного программного комплекса и модифицированной модели EPIC для прогноза урожайности на территории Западной Сибири.

В рамках договора о научном сотрудничестве Западно-Сибирским УГМС были предоставлены метеорологические данные и данные по фактической урожайности для Новосибирской области и Алтайского края за 1985–2005 гг., а также Тюменским ЦГМС для Тюменской области за 2003–2004 гг. Для автоматизации проведения расчетов был создан программный комплекс SDIM. В диссертации приведена характеристика разработанного программного

комплекса, включающего модифицированную модель ЕРІС и реляционную базу агрометеопараметров по Тюменской, Новосибирской областям и Алтайскому краю. Для компьютерной реализации модели и выбранной реляционной модели базы данных выбрана среда программирования Borland Delphi. В системе разработан дружественный интерфейс, позволяющий редактировать и форматировать данные в базе, осуществлять экспорт и импорт во внешние источники. При проведении расчетов производится настройка параметров модели (рис. 4) с использованием методов по координатного и наискорейшего спуска, выбор культуры, даты сева, агро- и метеоданных для года расчета, а также подготовка спутниковой информации для корректировки листового индекса и биомассы растений. Результатами расчетов являются: величина урожайности, дата уборки, ежедневное изменение листового индекса и биомассы и т.д.

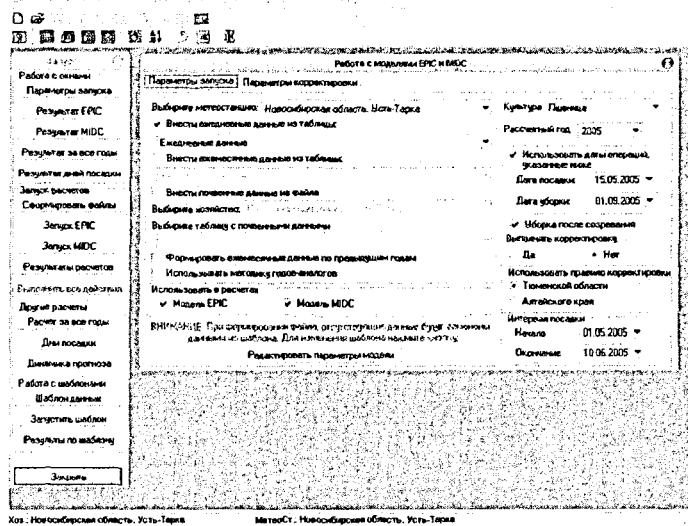


Рис. 4. Программный комплекс SDIM. Настройка параметров модели

По заказу Департамента агропромышленного комплекса администрации Тюменской области в 2004 г. проводились работы по мониторингу состояния сельскохозяйственных полей и прогнозированию урожайности яровых зерновых культур. Для каждого административного района Тюменской области, имеющего метеостанцию, по модифицированной модели ЕРІС было проведено моделирование роста и развития зерновых культур (яровая пшеница, ячмень, овес, горох). На этом этапе осуществлен подбор параметров модели для каждого района (определялись усредненные сроки сева и почвенные характеристики модели) и общие для всех районов варьируемые характеристики (индекс урожайности и другие параметры). Определение даты начала уборки проводилось по двум критериям: по прекращению наращивания биомассы и по падению листового индекса до нуля.

На рисунке 5 представлена сравнительная динамика прогнозируемой и фактической урожайности по Тюменской области в целом. Как видно из графика погрешность расчетов урожайности не превышает 1 га.

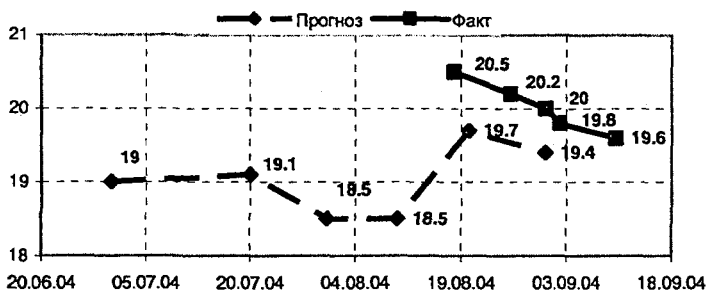


Рис. 5. Динамика прогнозируемой и фактической урожайности по Тюменской области в 2004 г.

В таблице 2 представлены результаты прогноза урожайности по 8 районам Тюменской области по состоянию на конец августа 2004 г. (погрешность 10.24%).

Таблица 2
Прогноз урожайности яровой пшеницы (ц/га) на 25 августа 2004 г.
по районам Тюменской области

№	Район	Фактическая урожайность, ц/га	Расчетная урожайность, ц/га
1.	Абатский	23.50	24.61
2.	Вагайский	17.70	17.16
3.	Викуловский	16.90	20.97
4.	Голышмановский	17.70	20.88
5.	Ишимский	26.40	22.72
6.	Тобольский	13.60	14.87
7.	Тюменский	18.70	18.51
8.	Ялуторовский	16.40	15.12
Средняя по 8 районам области		18.86	19.36

Поскольку в Тюменской области имеется недостаточно густая сеть метеостанций, проводилась коррекция листового индекса с использованием зависимости LAI от $NDVI$ по данным сканера MODIS. Так, для семеноводческого хозяйства СПК «Емуртлинское» Омутинского района Тюменской области при коррекции модели EPIC по спутниковой оценке листового индекса урожайность составила 46 ц/га. Что подтверждается данными статотчетности.

В рамках работ по госконтракту ИТ-ЮГРА-3 в 2005–2006 гг. на конец первой декады июля выполнялось прогнозирование урожайности и сроков созревания яровой пшеницы для Новосибирской области и Алтайского края по адаптированной модели биопродуктивности EPIC.

Прогнозы на 11 июля и 31 августа передавались в департамент АПК администрации Новосибирской области совместно с ЗапСРЦПОД. Так, например, прогнозируемая биологическая урожайность яровой пшеницы на 11 июля 2006 г. для Алтайского края составила 9.6 ц/га, а фактическая – 10.4 ц/га. Динамика прогнозируемой и фактической урожайности яровой пшеницы по Но-

новосибирской области в 2005 году представлена на рисунке 6, по районам области в 2006 г. — на рисунке 7.

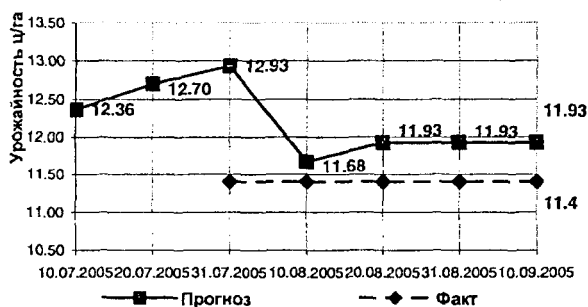


Рис. 6. Динамика прогнозируемой и фактической урожайности яровой пшеницы по Новосибирской области в 2005 г.

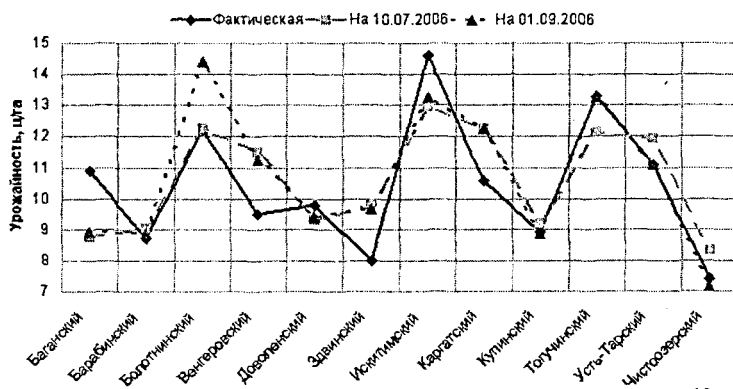


Рис. 7. Фактическая и прогнозируемая урожайность яровой пшеницы на 10 июля и 1 сентября 2006 г. по районам Новосибирской области

Для регионов Западной Сибири также проводилась коррекция листового индекса с использованием зависимости LAI от $NDVI$ по данным сканера MODIS. Пример расчетов основных биометрических показателей без коррекции (урожайность 13.29 ц/га, рис. 8) и с коррекцией листового индекса (15.35 ц/га, рис. 9) для Коченёвского района Новосибирской области в 2005 г. представлен на рисунке 8. Фактическая урожайность 15.7 ц/га.

На рисунке 10 представлена динамика прогнозируемой урожайности в зависимости от фактических метеоусловий. Из рисунка видно, что колебания в расчетных значениях биологической урожайности яровой пшеницы становятся минимальными в конце июля. Это подтверждает возможность прогноза урожайности яровой пшеницы на юге Западной Сибири за месяц до начала уборки.

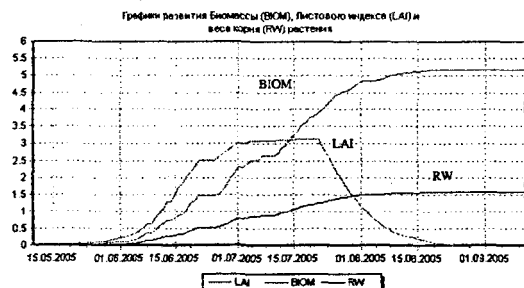


Рис. 8. Результаты расчетов для Коченёвского района
Новосибирской области без коррекции листового индекса

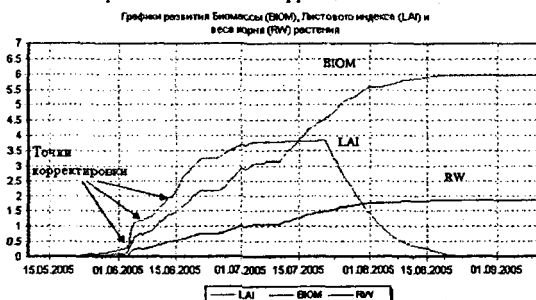


Рис. 9. Результаты расчетов для Коченёвского района
Новосибирской области с коррекцией листового индекса

В таблицах приведены результаты прогноза для отдельных районов дан-
ных регионов.

Таблица 3

Прогноз урожайности яровой пшени-
цы (ц/га) на 2004 г. по районам
Алтайского края

№	Район	Фактическая урожайность, ц/га	Расчетная урожайность, ц/га
1.	Барнаул (сель- ские)	14.7	15.48
2.	Благовещенский	10.4	9.91
3.	Волчихинский	9.8	10.99
4.	Земановский	13.6	15.7
5.	Каменский	14.4	13.39
6.	Ключевской	6.8	8.11
7.	Мамонтовский	14.8	16.68
8.	Рубихинский	19.6	16.79
9.	Рубцовский	9.6	11.95
10.	Славгородский	5.2	8.49
11.	Усть- Пристанский	11.3	14.11
Средняя по 13 рай- онам края		11.83	12.87

Погрешность 17.7%.

Таблица 4

Прогноз урожайности яровой пшени-
цы (ц/га) на 2004 г. по районам Новоси-
бирской области

№	Район	Фактическая урожайность, ц/га	Расчетная урожайность, ц/га
1.	Баганский	12.8	10.62
2.	Барабинский	13.3	14.03
3.	Венгеровский	14.8	15.94
4.	Доволенский	12.1	11.51
5.	Здвинский	15.3	14.16
6.	Искитимский	14.7	14.66
7.	Каргатский	14.5	16.87
8.	Коченевский	16.5	16.11
9.	Краснозёрский	15.1	10.23
10.	Купинский	13.5	9.53
11.	Новосибирский	19.8	15.19
12.	Ордынский	18.6	14.48
13.	Тогучинский	16.8	16.82
14.	Усть-Тарковский	13.3	13.78
15.	Чистоозёрский	14.8	13.42
Средняя по 15 рай- онам области		15.06	13.82

Погрешность 11.9%.

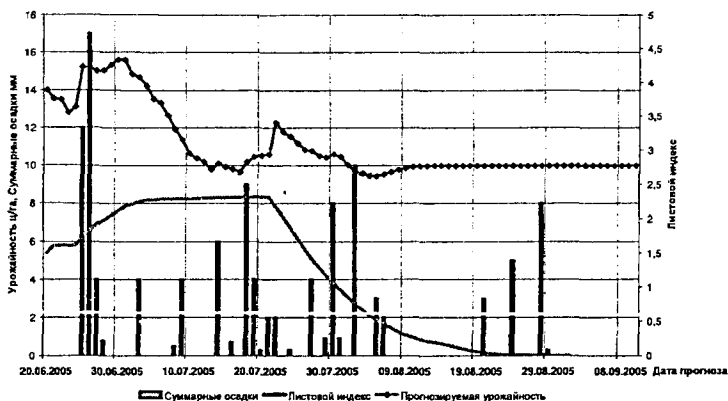


Рис. 10. Динамика прогнозируемой урожайности, листового индекса и осадков для метеостанции Здвинск Новосибирской области

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

1. Модифицированы математические модели следующих блоков ЕРИС:

- блока входных данных по солнечной радиации путем замены экспериментально измеренных значений приходящей коротковолновой фотосинтетически активной солнечной радиации на расчетные. Расчет производился через относительную влажность воздуха, ежедневно измеряемую на всех метеостанциях Росгидромета;
- блока теплового режима почвы. Расчет максимальной температуры почвы проводится через суммарную коротковолновую солнечную радиацию, а минимальной – через эффективное излучение атмосферы;
- блока расчета листового индекса. Корректировка листового индекса по спутниковым изображениям проводится 3-4 раза за вегетационный период до достижения LAI максимального значения.

2. Разработан программный комплекс обработки экспериментальных данных на основе численных методов, позволяющий настраивать модель биопродуктивности для различных агроклиматических зон по многолетним рядам метеонаблюдений.

3. Показано, что разработанный метод прогнозирования урожайности зерновых культур, позволяет определять в течение вегетационного периода основные параметры биопродуктивности зерновых культур: биомассу, листовой индекс, высоту растения и вес корня, давать заблаговременную (за месяц до уборки) оценку урожайности с точностью до 1 ц/га и определять сроки начала уборки зерновых культур, используя модель биопродуктивности, ежедневные данные метеостанций и данные космического мониторинга.

Разработанная технология прогноза урожайности зерновых культур реализована в виде комплекса программных средств и апробирована в условиях зерновых провинций Западной Сибири.

РАБОТЫ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Хворова Л.А. Оценка возможности использования программного комплекса ЕРИС для прогноза урожайности Алтайского края / Л.А. Хворова, В.М. Брыксин, Д.В. Масленников // IV Сибирский конгресс по прикладной математике ИНПРИМ-2000, «Региональные проблемы развития Сибири и Дальнего востока». – Новосибирск : Институт математики, 2000. – С. 112.
2. Хворова Л.А. Система имитационного моделирования агроэкосистем / Л.А. Хворова, В.М. Брыксин, Д.В. Масленников // Вестник алтайской науки «Проблемы агропромышленного комплекса». – Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 2001. – Т 1. – С. 277–279.
3. Брыксин В.М. Модель урожайности зерновых культур / В.М. Брыксин, Д.В. Масленников // Сборник трудов международной конференции студентов и аспирантов «Экономика. Бизнес. Информационные технологии». – Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 2001. – С. 123–126.
4. Хворова Л.А. Применение математических методов и математического моделирования для оценки агроклиматического потенциала территорий / Л.А. Хворова, В.М. Брыксин // Известия Алтайского государственного университета. – 2002. – №1(23). – С. 41–46.
5. Хворова Л.А. Разработка методов классификации объектов с помощью функций отклика / Л.А. Хворова, В.М. Брыксин // Математические методы в механике природных сред и экологии : материалы всероссийской конференции. – Барнаул, 2002. – С. 31–33.
6. Хворова Л.А. Возможности использования системы имитационного моделирования агроэкосистем при решении эколого-экономических задач региона / Л.А. Хворова, В.М. Брыксин, Д.В. Масленников // Современные проблемы, тенденции и перспективы управления региональными социально-экономическими системами : материалы международной научно-практической конференции. – Усть-Каменогорск, 2002. – С. 351–353.
7. Брыксин В.М. Оценка экономического эффекта от использования агрометеорологической информации и прогнозов в агропромышленном комплексе / Л.А. Хворова, В.М. Брыксин // Региональная экономика в информационном измерении: модели, оценки, прогнозы : сборник научных трудов. – М.-Барнаул : Изд-во «Бизнес-Юнитек», 2003. – С. 203–214.
8. Кирюшин Ю.Ф. Программа работ по оценке урожайности зерновых культур на территории Алтайского края / Ю.Ф. Кирюшин, Е.И. Роговский, Н.М. Оскорбин, Е.В. Понькина, Л.А. Хворова, А.В. Евтюшкин, В.М. Брыксин // Современный агробизнес: состояние и перспективы развития : доклады международной заочной научно-практической

конференции / под общ. ред. М.П. Гриценко. – Барнаул : Изд-во АГИ-ИК, 2003. – С. 8–14.

9. Разработка методики прогноза урожайности и оценки валовых сборов зерновых культур по данным дистанционного зондирования Земли из космоса // Отчет за 2004 год: Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, 2005г. – Екатеринбург : «Издательство Баско», 2005. – С. 38–41.
10. Хворова Л.А. Моделирование теплового режима почвы с учетом проходящей длинноволновой радиации / Л.А. Хворова, В.М. Брыксин, Т.С. Скобова // Известия Алтайского государственного университета. – 2005. – №1(45). – С. 74–77.
11. Брыксин В.М. Оценка урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и модели биопродуктивности / В.М. Брыксин, А.В. Евтюшкин // ГЕО-Сибирь-2005. Т. 5. Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли : сборник материалов научного конгресса, 25–29 апреля 2005 г., Новосибирск. – Новосибирск : СГГА, 2005. – С. 218–223.
12. Bryksin V.M. Sharing of model bioefficiency EPIC and space images TERRA MODIS for forecasting productivity of grain crops [Электронный ресурс] / V.M. Bryksin, A.V. Yevtyushkin // Global Monitoring for Sustainability and Security : abstracts 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, June 20-24 2005, Saint Petersburg. URL: <http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/10026.pdf>.
13. Брыксин В.М. Оценка урожайности зерновых культур на Юге Западной Сибири на основе модели EPIC и многовременных космоснимков MODIS / В.М. Брыксин, А.В. Евтюшкин // Обратные задачи и информационные технологии рационального природопользования : материалы III научно-практической конференции, 25-27 апреля 2006г., Ханты-Мансийск. – Екатеринбург : Средне-Уральское книжное издательство, 2006. – С.187–191.
14. Брыксин В.М. Использование модели биопродуктивности EPIC и космоснимков MODIS для прогнозирования урожайности зерновых культур / В.М. Брыксин, А.В. Евтюшкин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов : сборник научных статей. – М. : ООО «Азбука-2000», 2007. – Вып. 4, том II. – С. 189–196.
15. Брыксин В.М. Мониторинг зерновых культур на юге Западной Сибири по данным MODIS и ERS-2 / В.М. Брыксин, А.В. Евтюшкин, Г.А. Кочергин, Н.В. Рычкова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явле-

ний и объектов : сборник научных статей. – М. : ООО «Азбука-2000», 2007. – Вып. 4, том II. – С. 183–188.

16. **Брыксин В.М.** Технология мониторинга зерновых культур по космоснимкам MODIS и ERS-2 / В.М. Брыксин, А.В. Евтюшкин, Г.А. Кочергин, Н.В. Рычкова // Роль и место дистанционного зондирования Земли в инфраструктуре пространственных данных : тезисы докладов всероссийской научно-технической конференции. – Екатеринбург : ФГУП «Уралгеоинформ», 2007. – С. 37–38.
17. **Брыксин В.М.** *Применение адаптированной модели биопродуктивности EPIC и космоснимков MODIS для прогнозирования урожайности зерновых культур на территории Западной Сибири* / В.М. Брыксин // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии.* – 2007. – Т. 5, вып. 1. – С. 20–26.
18. Развитие систем оперативного мониторинга и предсказания природных и техногенных процессов в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса, наземных измерений, геоинформационных систем и имитационного математического моделирования: Отчет по НИР (заключительный) / Югорский НИИ информационных технологий ; рук. темы В.Н. Копылов; исполн. А.В. Евтюшкин, **В.М. Брыксин** [и др.]. – Ханты-Мансийск, 2007. – 197 с. – №ГР 120.0 508578. Инв. 01/04-2007. Инв. номер во ВНИЦентре №0220.0801424.
19. **Брыксин В.М.** Технология прогнозирования урожайности зерновых культур на основе данных космического мониторинга и моделирования биопродуктивности / В.М. Брыксин, А.В. Евтюшкин // Обратные задачи и информационные технологии рационального природопользования : материалы IV научно-практической конференции. – Ханты-Мансийск : Полиграфист, 2008. – С. 181–186.
20. **Брыксин В.М.** Мониторинг и распознавание видового состава зерновых культур на юге Западной Сибири по данным MODIS и ERS-2 / В.М. Брыксин, А.В. Евтюшкин, Г.А. Кочергин, Н.В. Рычкова // Контроль и реабилитация окружающей среды : материалы VI международного симпозиума, 3-5 июля 2008 г., Томск / под общ. ред. М.В. Кабанова, А.А. Тихомирова. – Томск : Аграф-Пресс. – 2008. – С. 268–270.

Подписано к печати 21.05.2009 г. Формат бумаги 60×84/16.
Печать офсетная. Объем 1 печ.л. Заказ № 215. Тираж 100 экз.

656049, г. Барнаул, ул. Димитрова, 66.
Типография Алтайского государственного университета